



MEDIDA DO MÓDULO CISALHANTE MÁXIMO DE AREIA QUARTZOSA EM
CENTRÍFUGA ATRAVÉS DO ENSAIO MINI *AIR HAMMER*

Rodolfo Torres de Carvalho Barboza

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadoras: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Silvia Gomes Fernandes Polido Lemos

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2024

MÓDULO CISALHANTE MÁXIMO DE AREIA QUARTZOSA OBTIDO ATRAVÉS DO
ENSAIO MINI *AIR HAMMER* EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

Rodolfo Torres de Carvalho Barboza

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO – UFRJ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Sílvia Gomes Fernandes Polido Lemos

Alessandra Conde de Freitas

Márcio de Souza Soares de Almeida

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2024

Rodolfo Torres de Carvalho Barboza

Módulo cisalhante máximo de areia quartzosa obtido através do ensaio mini *air hammer* em centrífuga geotécnica - Rodolfo Torres de Carvalho Barboza – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2024.

v, 81 p.: il.;29,7 cm

Orientadoras: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Silvia Gomes Fernandes Polido Lemos

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 68-72.

1. Módulo cisalhante dinâmico máximo. 2. Ensaio mini *air hammer*. 3. Modelagem Centrífuga. 4. Pluviação de areias. 4. 5. Areias quartzosas. I. Almeida, Maria Cascão Ferreira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Medida do módulo cisalhante máximo de areia quartzosa em centrífuga através do ensaio mini *air hammer*.

Em memória da minha irmã, Rafaella.
Que você continue sendo meu exemplo,
inspiração e esteja sempre comigo!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

MÓDULO CISALHANTE MÁXIMO DE AREIA QUARTZOSA OBTIDO ATRAVÉS DO ENSAIO MINI *AIR HAMMER* EM CENTRÍFUGA GEOTÉCNICA

Rodolfo Torres de Carvalho Barboza

Fevereiro de 2024

Orientadoras: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Silvia Gomes Fernandes Polido Lemos

O desenvolvimento de projetos de estruturas esbeltas, como os arranha-céus e as turbinas eólicas *offshore*, vem estimulando o estudo do comportamento da interação dinâmica solo-estrutura, sendo fundamental o conhecimento dos parâmetros dinâmicos do solo, a exemplo do módulo cisalhante. O presente trabalho se insere no projeto de pesquisa “Estudo do Comportamento de Fundações de Turbinas Eólicas *Offshore*” desenvolvido no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE/UFRJ, especificamente na parte que tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem física em centrífuga, o comportamento a longo prazo de turbinas eólicas *offshore* suportadas por fundação em *monopile* em solos arenosos. Para obtenção de parâmetros representativos em laboratório é fundamental a reconstituição do solo em escala reduzida nas condições encontradas no campo, o que pode ser obtida através da modelagem física em centrífuga. O trabalho tem como objetivo o desenvolvimento em centrífuga geotécnica do dispositivo denominado *air hammer* para obtenção do módulo cisalhante máximo ($G_{máx}$), parâmetro que traduz a rigidez inicial do solo. O modelo de solo foi preparado pela metodologia de pluviação automática a seco apresentando repetibilidade adequada. A velocidade da onda cisalhante (V_s) foi obtida através da medida do tempo de viagem da onda entre dois acelerômetros consecutivos, permitindo a obtenção do perfil de $G_{máx}$ com a profundidade. Para validação do dispositivo experimental desenvolvido os valores experimentais de $G_{máx}$ foram comparados com as estimativas obtidas por meio de correlações empíricas consagradas na literatura.

Palavras-chave: módulo cisalhante máximo, ensaio mini *air hammer*, modelagem centrífuga, pluviação de areias, areias quartzosas.

MAXIMUM SHEAR MODULE OF QUARTZ SAND OBTAINED THROUGH THE MINI AIR HAMMER TEST IN GEOTECHNICAL CENTRIFUGE

Rodolfo Torres de Carvalho Barboza

February, 2024

Advisors: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Silvia Gomes Fernandes Polido Lemos

The development of projects involving slender structures, such as skyscrapers and offshore wind turbines, has prompted extensive research into soil-structure dynamic interaction. Understanding dynamic soil parameters, particularly the shear modulus, is crucial. This study is part of the research project "Behavior Analysis of Offshore Wind Turbine Foundations" at the Multiuser Laboratory in Centrifuge Modeling (LM²C) at COPPE/UFRJ. Specifically, it focuses on evaluating the long-term behavior of offshore wind turbines with monopile foundations in sandy soils through centrifuge physical modeling. To obtain laboratory representative parameters, the soil reconstitution under scaled-down field conditions is essential, achievable through centrifuge modeling. This work aims to develop the air hammer device to obtain the small strain shear modulus ($G_{m\acute{a}x}$), reflecting the initial soil stiffness. The soil model, prepared using an automatic sand pourer, presents adequate repeatability. Shear wave velocity (V_s) is determined by measuring the wave travel time between two consecutive accelerometers, allowing the acquisition of the $G_{m\acute{a}x}$ profile with depth. To validate the experimental device, $G_{m\acute{a}x}$ values were compared with estimates from established empirical correlations in the literature.

Keywords: small strain shear modulus; air hammer test; centrifuge modeling; sand pourer; quartz sands.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	19
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	OBJETIVOS.....	21
1.3.1	Objetivos específicos	21
1.4	ESTRUTURA DO CONTEÚDO	21
2.	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	MÓDULO CISALHANTE MÁXIMO	23
2.1.1.	Propagação de ondas em meios contínuos	25
2.1.2.	Dispositivo <i>air hammer</i>.....	26
2.1.3.	Correlações empíricas.....	28
2.2	MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	30
2.2.1	Pluviação automática	31
2.3	MODELAGEM CENTRÍFUGA.....	32
2.4	EFEITO DE BORDA	34
2.5	ENSAIO DE PIEZOCONE.....	35
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTAÇÃO.....	37
3.1.1	Centrífuga de braço	37
3.1.2	Mini air hammer	39
3.1.3	Acelerômetros	42
3.1.4	Osciloscópio.....	43
3.1.5	Célula de Carga	44
3.2	SOLO.....	46
3.2.1	Caracterização e preparação da areia.....	46
3.2.2	Calibração do pluviador automático	50

3.3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	54
3.3.1	Mini air hammer	54
3.3.2	Mini CPT.....	56
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
4.1	ENSAIO MINI CPT	58
4.2	ENSAIOS MINI AIR HAMMER	60
4.3	PREVISÕES TEÓRICAS DE $G_{MÁX}$ VERSUS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	65
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.1	PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	67
5.2	ENSAIO MINI AIR HAMMER	67
5.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	APÊNDICE A – ENSAIOS MINI AIR HAMMER	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Relação entre o módulo cisalhante e a deformação cisalhante correspondente. Adaptado de Drnevich <i>et al.</i> (2015)	23
Figura 2-2 - Diferentes níveis de deformação cisalhante para diferentes eventos. Adaptado de Gomes (2020).	24
Figura 2-3 – Representação esquemática do movimento de superfície do terreno produzido pela onda de compressão. Adaptado de Kramer (1996).....	25
Figura 2-4 – Representação esquemática do movimento de superfície do terreno produzido pela onda de cisalhamento. Adaptado de Kramer (1996)	26
Figura 2-5 - Vista esquemática do <i>air hammer</i> (adaptado de ARULNATHAN <i>et al.</i> , 2000) .	27
Figura 2-6 - Esquema da posição dos acelerômetros dos ensaios realizados por (ARULNATHAN <i>et al.</i> , 2000)	27
Figura 2-7 - Resultado do módulo cisalhante máximo para (a) areia fofa e (b) areia compacta (FUTAI <i>et al.</i> , 2018).....	30
Figura 2-8- Visão ampla de um pluviador automático (MADABHUSHI, 2014).	31
Figura 2-9 - Chuveiro em operação (a) Funil, peneiras e o arcaçouço de sustentação, além do fluxo inicialmente concentrado de areia que depois se espalha e produz uma chuva uniforme sobre o molde (b) Chuveiro imediatamente antes do término da operação de moldagem. (FILHO, 1987).....	32
Figura 2-10 - Correspondência entre a tensão inercial em uma modelagem centrífuga induzida pela rotação em torno de um eixo fixo e a tensão gravitacional correspondente no protótipo (TAYLOR, 1994).	34
Figura 2-11 - Resistência de ponta obtida através do ensaio mini CPT em areia quartzosa	36
Figura 3-1 - Caixa de suporte para abrigar a amostra de solo pluviada	37
Figura 3-2 - Estrutura de suporte com novos componentes instalados (LEMOS, 2024)	38
Figura 3-3 - Atuador bidirecional.....	39
Figura 3-4 – Dimensões do <i>air hammer</i>	40

Figura 3-5 - Areia colada com epóxi na parte central do cilindro do <i>air hammer</i>	40
Figura 3-6 – Esquema dos componentes para a geração do impacto	41
Figura 3-7 - Teste de vedação do <i>air hammer</i>	42
Figura 3-8 - Conexão entre os acelerômetros e a interface do osciloscópio pelo software PicoScope 7	44
Figura 3-9 - Célula de carga de 5000 N utilizada nos ensaios de CPT	45
Figura 3-10 - Software LogLab com a aquisição dos dados	46
Figura 3-11 - Análise granulométrica da areia quartzosa (GOMES, 2020)	48
Figura 3-12 – Suporte para os acelerômetros	49
Figura 3-13 - Montagem tipo MB, S = 35,0 mm e I = 37,0 mm	50
Figura 3-14 - Montagem tipo MC, S = 35,0 mm e I = 35,0 mm	50
Figura 3-15 - Pluviador automático do Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM ² C).....	51
Figura 3-16 - Nivelamento das peneiras do pluviador automático.....	52
Figura 3-17 - Marcação da altura inicial de 30 cm medidos do fundo da caixa cilíndrica até a face inferior da última peneira.....	53
Figura 3-18 - Amostra logo após a pluviação e após o arrasamento.....	54
Figura 3-19 - Projeto do mini CPT utilizado.....	57
Figura 4-1 - Resultados do ensaio mini CPT a) ECPT1_MB_110, b) ECPT2_MB_110, c) ECPT3_MB_110, d) ECPT4_MB_110, e) ECPT5_MC_110, f) ECPT6_MC_110.....	59
Figura 4-2 - Resistência de ponta (q_c) x Profundidade dos ensaios de mini CPT	60
Figura 4-3 - Exemplo de sinal de output típico com os pontos em seta denotando as possíveis escolhas subjetivas para a chegada das ondas. Adaptado de Camelo (2021).....	61
Figura 4-4 - Resultado típico dos ensaios mini <i>air hammer</i>	62
Figura 4-5 - Velocidade da onda cisalhante (V_s) x Profundidade.....	63

Figura 4-7 - Comparação entre os módulos cisalhantes máximo ($G_{\text{máx}}$)66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de escala modelo/protótipo (MADABHUSHI, 2014)	33
Tabela 2 - Principais Especificações do ADXL 1001	42
Tabela 3 - Índices físicos da areia quartzosa (GOMES, 2020)	46
Tabela 4 - Valores dos módulos cisalhantes máximos de areias quartzosas em cada tensão confinante obtidos através de ensaios de coluna ressonante realizados por Gomes (2020).....	47
Tabela 5 - Valores dos módulos cisalhantes máximos de areias quartzosas em cada tensão confinante obtidos através de ensaios de <i>bender elements</i> realizados por Gomes (2020)	47
Tabela 6 - Fator de escala “N” relacionado com as velocidades angulares ensaiadas	54
Tabela 7 - Programação de ensaios com <i>air hammer</i>	55
Tabela 8 - Programação de ensaios com mini CPT.....	57
Tabela 9 - Análise dos resultados obtidos através dos ensaios mini <i>air hammer</i>	62
Tabela 10 - Resultados dos ensaios mini air hammer tipo MB	64
Tabela 11 - Resultados dos ensaios mini air hammer tipo MB	65
Tabela 12 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios mini <i>air hammer</i>	77
Tabela 13 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios mini <i>air hammer</i>	79
Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios mini <i>air hammer</i>	81

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2-1 - Módulo cisalhante máximo	24
Equação 2-2 - Determinação da tensão confinante efetiva média.....	28
Equação 2-3 - Determinação da velocidade cisalhante	28
Equação 2-4 - Relação obtida por ensaios de <i>air hammer</i> , apresentada por Seed e Idriss (1970)	29
Equação 2-5 – Relação obtida por ensaios de <i>air hammer</i> , apresentada por Hardin e Drnevich (1972)	29
Equação 2-6 – Relação obtida por ensaios de <i>air hammer</i> , apresentada por Oztoprak e Bolton (2013)	29

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

#200: Malha de peneira com abertura de 0,074 mm

#60: Malha de peneira com abertura de 0,250 mm

$G_{\text{máx}}$: Módulo cisalhante máximo

D_{50} : Diâmetro médio das partículas

G_s : Densidade real dos grãos

K_0 : Coeficiente de empuxo horizontal no repouso

P_a : Pressão atmosférica

V_{pw} : Velocidade da onda de compressão da água

V_s : Velocidade de propagação da onda cisalhante

$e_{\text{máx}}$: Índice de vazios máximo

$e_{\text{mín}}$: Índice de vazios mínimo

$\gamma_{\text{máx}}$: Peso específico máximo do material

$\gamma_{\text{mín}}$: Peso específico mínimo do material

σ_c : Tensão confinante

σ'_m : Tensão confinante efetiva média

σ'_v : Tensão vertical efetiva

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CC: Coeficiente de curvatura

CNU: Coeficiente de não uniformidade das areias

COPPE: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

CPT: *Cone Penetration Test*

DR: Densidade relativa

m: Unidade de medida - metro

mm: Unidade de medida - milímetro

N: Fator de escala

QZ: Quartzosa

rpm: Rotações por minuto

s: Unidade de tempo - segundo

SPT: *Standard Penetration Test*

e: Índice de vazios

g: Aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

γ : Peso específico do material

ρ : Massa específica do material

ϕ : Ângulo de atrito do solo

V_0 : Tensão zero g

a_n : Aceleração aplicada na direção do sensor

V_n : Tensão medida devido à aceleração do sensor

C_F : Fator de calibração

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Mozart e Ana, ao meu irmão Rodrigo e à minha irmã Rafaella que, além de ser minha base familiar, também são meus maiores incentivadores. Mesmo durante a pandemia da COVID 19, fizeram com que os ambientes social e de estudo fossem perfeitos e as conversas e conselhos dados foram essenciais para meu crescimento pessoal. Sem essa família, que eu amo, nada disso seria possível.

Agradeço aos meus professores e mentores Márcio Almeida e Maria Cascão, que acreditaram em mim e deram a oportunidade de realizar a iniciação científica no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE/UFRJ - Setor Geotécnico. Após anos ajudando alunos de pós-graduação a realizarem seus experimentos, tive a oportunidade de executar meus próprios ensaios para a elaboração deste TCC (trabalho de conclusão de curso).

Agradeço à Dra. Silvia Polido, por toda sua orientação na pesquisa técnica e na elaboração dos ensaios que, com sua incrível paciência e incansável em seus esforços pessoais, viajou de Vitória ao Rio de Janeiro, simplesmente para garantir a qualidade técnica de meus ensaios. Com conselhos imprescindíveis e sempre de bom humor, mas enérgica quando se fez necessário, tornou possível a elaboração deste trabalho com qualidade.

Agradeço à toda equipe do LM²C composta pelos alunos de iniciação científica Pedro, Matheus, Luiz, ao técnico Vinícius e, principalmente, ao MSc. William, engenheiro mecatrônico que resolveu todos os problemas “insolúveis” da centrífuga em tempo hábil para que não fosse perdido nenhum dia de ensaio. Meus agradecimentos à equipe administrativa do laboratório, Alice, com um agradecimento especial à Tatiane.

Agradeço também aos meus colegas de faculdade e professores, pois ninguém termina um curso dessa magnitude e complexidade sozinho. Cada pessoa conhecida, cada momento de alegria e tristeza, cada discussão de conteúdo, cada ensinamento dado e adquirido, cada nova história, me fizeram crescer como pessoa, estudante e principalmente, como futuro engenheiro geotécnico.

Agradeço, finalmente, à empresa Casagrande Engenharia e Consultoria, onde realizei meu estágio, pela liberação do tempo necessário para a execução dos ensaios de laboratório.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Apesar da importância da interação dinâmica solo-estrutura, muitas simplificações ainda são admitidas na elaboração e desenvolvimento de projetos de fundações de estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos e/ou cíclicos, muitas vezes devido à dificuldade na obtenção de parâmetros geotécnicos que reproduzam o comportamento do solo principalmente a longo prazo.

Para as estruturas esbeltas, como os arranha-céus e as turbinas eólicas *offshore*, o conhecimento de parâmetros dinâmicos é fundamental. Essas estruturas apresentam características únicas devido à distribuição de massa e rigidez ao longo da altura, e às cargas que agem sobre elas, que incluem componentes cíclicos e dinâmicos.

Dentre os diversos tipos de geração de energias renováveis a energia eólica *offshore* se encontra em franca expansão no mundo. Uma das vantagens da geração de energia eólica *offshore* é a maior disponibilidade de espaço em mar, possibilitando a instalação de grandes parques eólicos, ao mesmo tempo que permite instalações próximas aos centros urbanos do litoral, com reduzido impacto visual e sonoro. Outra grande vantagem dos parques eólicos *offshore* é a presença de ventos mais fortes e constantes, o que leva a um melhor aproveitamento e operação da turbina.

No Brasil já é grande o interesse para o desenvolvimento de novos projetos para instalação de parques eólicos *offshore*, existindo, conforme o site do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos (2023), 96 projetos de complexos eólicos *offshore* com processos de licenciamento ambiental abertos no IBAMA, o que tem motivado estudos e pesquisas do comportamento destas estruturas, como as conduzidas no Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE-UFRJ (e.g. BARRA, 2020; GOMES, 2020; FERREIRA, 2021; LOPES *et al.*, 2023, ALMEIDA *et al.*, 2023 e LEMOS, 2024).

1.2 JUSTIFICATIVA

A modelagem física visa obter um modelo em escala reduzida que seja capaz de fornecer uma reprodução física de um fenômeno associado a um problema real, retratando as tensões geostáticas encontradas no campo (no protótipo) e desempenhando um papel importante nas análises geotécnicas de uma maneira mais econômica. Nesse contexto, a modelagem em centrífuga vem se tornando cada vez mais importante devido à sua flexibilidade em relação à simulação de vários problemas de engenharia e a possibilidade de modelar corretamente as tensões no solo.

As pesquisas conduzidas no Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE-UFRJ têm demandado o conhecimento de parâmetros dinâmicos de areias utilizadas nos estudos da interação solo-estrutura de turbinas eólicas *offshore*. Os modelos centrífugos destas estruturas foram ensaiados com baixos níveis de deformações cisalhantes, sendo importante para as análises dos resultados experimentais a obtenção dos parâmetros de deformabilidade do solo. O módulo cisalhante máximo ($G_{m\acute{a}x}$), parâmetro que traduz a rigidez inicial do solo, foi obtido por Gomes (2020) através dos ensaios de laboratório de coluna ressonante e *bender elements*.

Complementando a pesquisa de Gomes (2020), o objetivo deste trabalho é descrever o processo de validação/ uso de dispositivo *air hammer* para a obtenção de perfil de $G_{m\acute{a}x}$ com a profundidade em amostras de areais ensaiadas em voo na centrífuga geotécnica de braço. O ensaio de *air hammer* permite a obtenção da velocidade da onda cisalhante (V_s) através da medida do tempo de viagem da onda cisalhante no solo entre dois acelerômetros consecutivos, permitindo a obtenção do perfil de $G_{m\acute{a}x}$ com a profundidade se os ensaios forem realizados em diferentes acelerações da centrífuga.

A realização do ensaio exige a preparação da amostra de forma criteriosa para a reconstituição das condições do solo em campo. O método de preparação da amostra do solo deve ser capaz de (1) reproduzir amostras de solo na faixa de peso específico unitário esperado em um depósito *in situ*; (2) manter uma proporção de vazios uniforme em todo o volume da amostra; (3) não permitir a segregação granulométrica da amostra, independentemente de sua distribuição granulométrica ou do teor de finos; (4) simular o processo de deposição do solo encontrado *in-situ* (KUERBIS, 1988).

Sendo assim foi necessário estabelecer um procedimento de ensaio envolvendo a preparação da amostra de solo em conjunto com os dispositivos do ensaio *air hammer*. O desenvolvimento do dispositivo envolveu processos de calibração para geração de ondas cisalhantes com energia suficiente para serem captadas pelos acelerômetros e adquiridas pelo osciloscópio com níveis de deformação aceitáveis.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento para uso na centrífuga geotécnica do Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE-UFRJ do dispositivo experimental denominado *air hammer* para obtenção do módulo de cisalhamento para pequenas deformações do solo, denominado mais comumente como módulo cisalhante máximo ($G_{máx}$).

1.3.1 Objetivos específicos

São objetivos específicos dessa pesquisa:

- Adaptação de procedimento de ensaio para preparação da amostra de solo em conjunto com os dispositivos do ensaio *air hammer* utilizando o sistema automático de pluviação para a obtenção da densidade relativa de 80% requerida para a areia estudada;
- Comparar a resistência de ponta ao longo da profundidade, verificando, assim, a repetibilidade da preparação da amostra de areia para a obtenção de densidade relativa de 80% a partir do ensaio de CPT;
- Desenvolvimento do dispositivo experimental *air hammer* para aplicação na centrífuga geotécnica de braço, incluindo calibrações e definição dos procedimentos de ensaio, visando à obtenção do módulo de cisalhante máximo na areia quartzosa estudada;
- Validação do dispositivo experimental *air hammer* desenvolvido através da comparação dos resultados experimentais com estimativas obtidas por meio de correlações teóricas e com resultados obtidos pelos ensaios de coluna ressonante e *bender elements*.

1.4 ESTRUTURA DO CONTEÚDO

Os estudos desenvolvidos pelo presente trabalho serão divididos em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta o contexto geral da pesquisa, justificativa e objetivos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica relacionada às metodologias para obtenção do módulo cisalhante máximo de areias, à modelagem centrífuga e ao ensaio de *air hammer*.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e metodologias utilizados para alcançar os objetivos do presente estudo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios CPT e *air hammer* incluindo a análise destes resultados através da comparação com as proposições teóricas consagradas na literatura e com outros resultados experimentais obtidos nas pesquisas do LM²C.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões da pesquisa e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MÓDULO CISALHANTE MÁXIMO

O módulo cisalhante (G) é um parâmetro que relaciona a tensão cisalhante à deformação associada ao cisalhamento do solo. Para deformações cisalhantes muito pequenas, da ordem de 0,0001%, pode-se considerar que este parâmetro possui valor constante, denominado de módulo de rigidez inicial ou módulo cisalhante máximo ($G_{\text{máx}}$). O valor de $G_{\text{máx}}$ é de grande importância, visto que traduz a rigidez inicial (máxima) do solo, ocorrendo, na sequência, a sua degradação com o aumento da deformação cisalhante. Sua curva padrão de degradação está esquematizada na Figura 2-1 (DRNEVICH *et al.*, 2015).

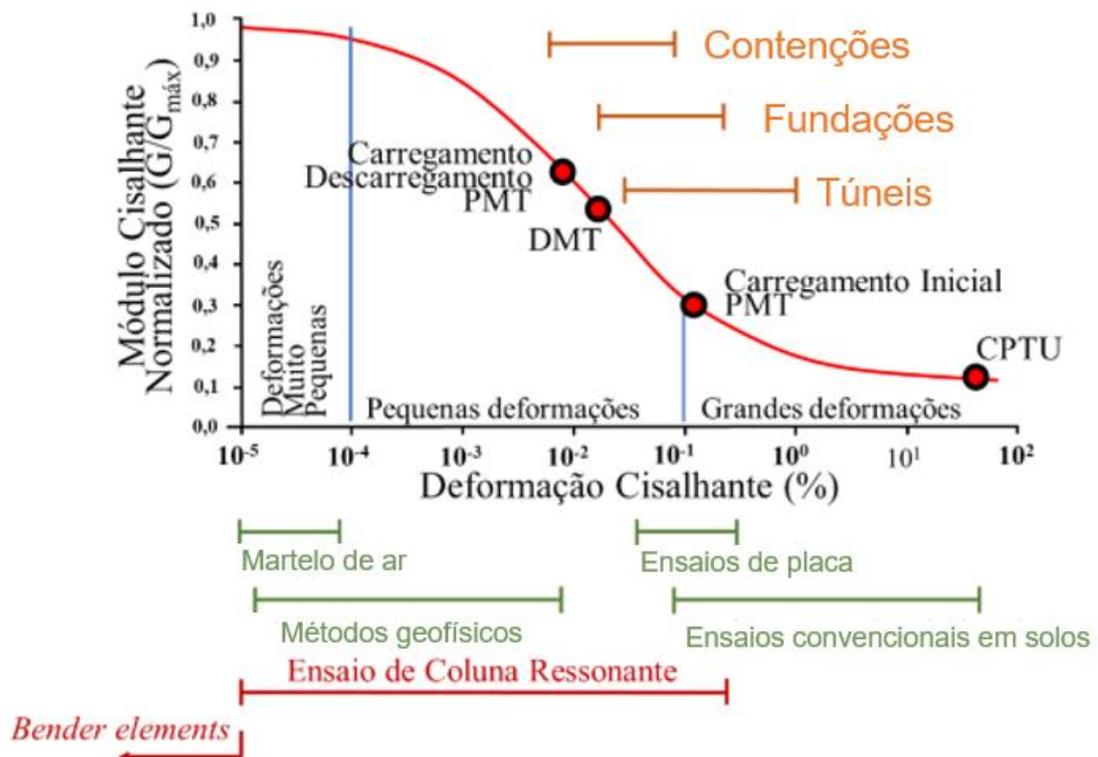


Figura 2-1 - Relação entre o módulo cisalhante e a deformação cisalhante correspondente. Adaptado de Drnevich *et al.* (2015)

As obras geotécnicas sob carregamentos dinâmicos exigem o conhecimento da interação dinâmica solo-estrutura, associado às perturbações no solo por elas provocadas. Desse modo, para efetuar um dimensionamento adequado destas obras, torna-se imprescindível o conhecimento do comportamento dinâmico do solo nos níveis correspondentes ao de suas

deformações cisalhantes impostas. A Figura 2-2 mostra o nível de tensões cisalhantes correspondentes a diferentes eventos.

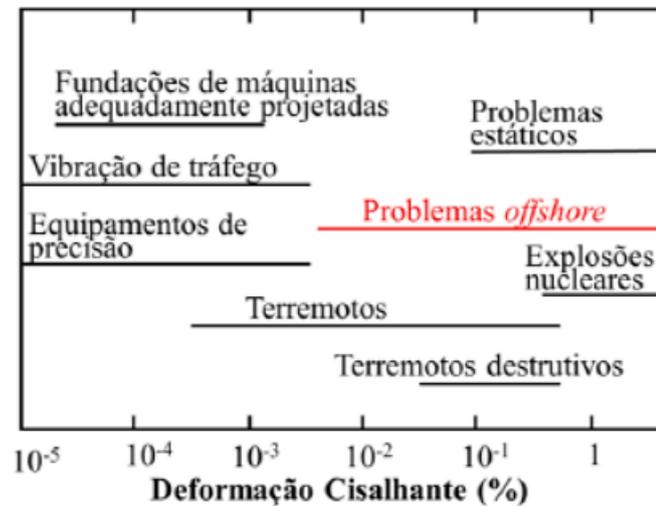


Figura 2-2 - Diferentes níveis de deformação cisalhante para diferentes eventos. Adaptado de Gomes (2020).

Existem diversas maneiras consagradas de se obter o módulo cisalhante máximo, tanto por meio dos ensaios de campo (DMT-S, Cross-Hole, Refração Sísmica etc.), como por meio de ensaios de laboratório (coluna ressonante, *bender elements*, *air hammer*, etc). Na quase totalidade dos ensaios a determinação do parâmetro $G_{m\acute{a}x}$ é efetuada através da medida da velocidade da onda de cisalhamento (V_s).

Uma das vantagens do uso de V_s para o cálculo do $G_{m\acute{a}x}$ reside no fato de que as medições em laboratório podem ser realizadas com acurácia e sob condições controladas em pequenas amostras representativas do material a ser investigado. Isto permite variações paramétricas, possibilitando comparações diretas entre o comportamento do solo no campo e em laboratório. Outra vantagem do uso do parâmetro V_s é ser uma propriedade mecânica do solo diretamente relacionada a $G_{m\acute{a}x}$ através da equação abaixo (ANDRUS e STOKOE II, 2000).

$$G_{m\acute{a}x} = V_s^2 \times \rho \text{ - (MPa)} \quad (2-1)$$

sendo:

$G_{m\acute{a}x}$ = módulo de cisalhamento máximo

V_s = velocidade da onda de cisalhamento

ρ = massa específica do solo

A equação mostra que o parâmetro a ser obtido é a velocidade da onda cisalhante (V_s) em meio particulado e isotrópico.

2.1.1. Propagação de ondas em meios contínuos

A propagação de ondas em meios contínuos é a base teórica do cálculo do módulo cisalhante máximo que tem como sua única variável a velocidade da onda de cisalhamento no solo (V_s). Sabe-se que em meios contínuos existem dois tipos principais de ondas, as de compressão e as de cisalhamento.

A onda que se propaga longitudinalmente em meios contínuos é a onda elástica de compressão. Sua propagação ocorre no sentido longitudinal dos esforços gerados por uma fonte, ocasionando somente esforços de compressão e de tração no meio (Figura 2-3). A onda P consegue se propagar em materiais sólidos e líquidos e é governada pela compressibilidade volumétrica do meio. Sabendo-se que a água é relativamente incompressível quando comparada ao esqueleto sólido do solo, a medida da velocidade da onda P em solos saturados normalmente representa a velocidade de propagação da onda P na água. Assim, tal medida não fornece nenhuma informação sobre as propriedades elásticas do solo (e.g. KRAMER, 1996; BARROS, 1997 e BRIAUD, 2013).

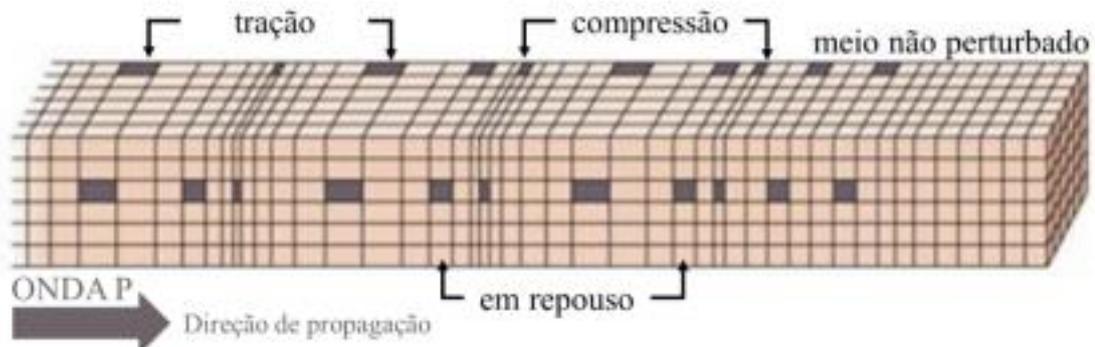


Figura 2-3 – Representação esquemática do movimento de superfície do terreno produzido pela onda de compressão. Adaptado de Kramer (1996)

A onda cisalhante é o segundo tipo de onda elástica, sendo também chamada de onda transversal ou onda S. Esse tipo de onda caracteriza-se pelo esforço de cisalhamento, que é perpendicular à direção da propagação da onda como mostra a Figura 2-4 (e.g. KRAMER, 1996 e BRIAUD, 2013). Como a onda cisalhante se propaga sem variação de volume, a presença de água no solo não afeta as medições de V_s , embora haja trabalhos em que são citados os efeitos do solo não saturado na variação de V_s . (ARULNATHAN *et al.*, 2000)

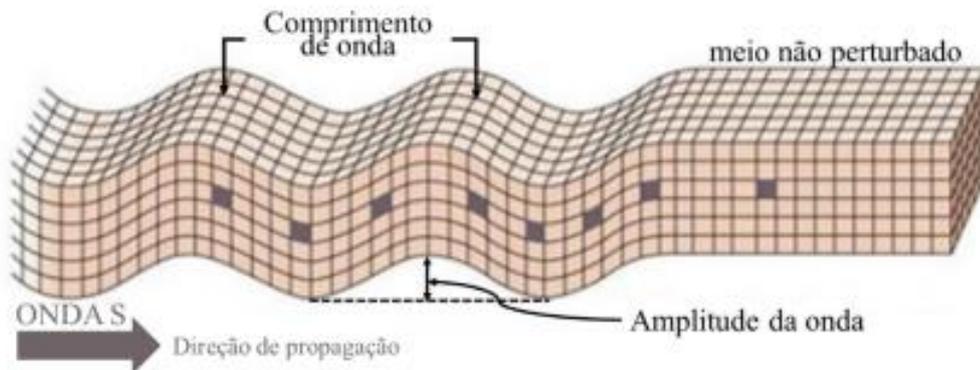


Figura 2-4 – Representação esquemática do movimento de superfície do terreno produzido pela onda de cisalhamento. Adaptado de Kramer (1996)

Observou-se que, apesar de não ser um meio contínuo, e sim particulado, o conceito de onda elástica também se mostra válido para o cálculo da rigidez inicial dos solos, como apresentado na 1.

Dessa forma, a partir da velocidade da onda S, é possível determinar diretamente o módulo cisalhante máximo do solo, mesmo saturado ou quando o solo apresenta comportamento não-drenado (e.g. BARROS, 1997 e BRIAUD, 2013).

2.1.2. Dispositivo *air hammer*

A literatura reporta ser o *air hammer* uma ferramenta eficiente e de baixo custo para obtenção do módulo cisalhante máximo em modelos físicos. O módulo cisalhante máximo é obtido utilizando a medida da velocidade da onda cisalhante considerando a hipótese do solo como um meio contínuo através da .

O *air hammer* consiste em um cilindro vazado em ambas as extremidades permitindo a passagem do ar comprimido que deverá exercer uma pressão no pistão, como esquematizado na Figura 2-5. O pistão ao ser acionado se desloca e entra em contato com a parede do cilindro gerando uma onda cisalhante na amostra de solo. A passagem da onda cisalhante é detectada pelos acelerômetros dispostos de forma alinhada em diferentes profundidades, como exemplifica a Figura 2-6. Através da diferença de tempo entre os sinais captados (Figura 2-6) e conhecendo a distância entre os acelerômetros é possível calcular a velocidade da onda cisalhante e obter o módulo de rigidez inicial das camadas da amostra de solo.

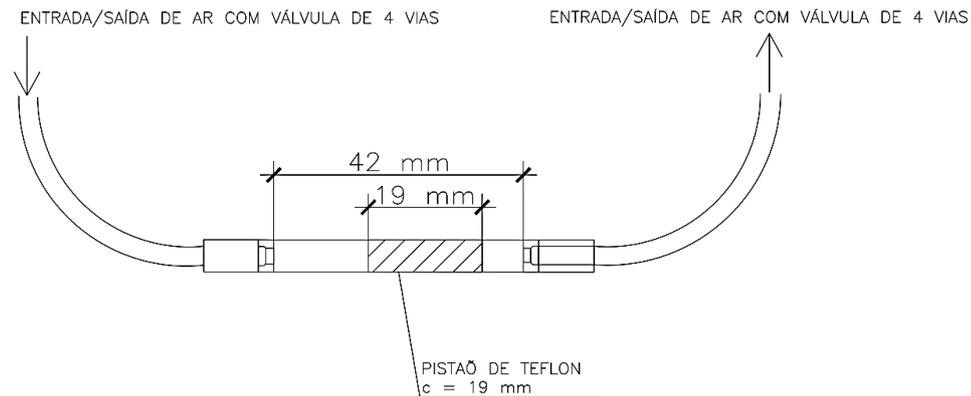


Figura 2-5 - Vista esquemática do *air hammer*. Adaptado de Arulnathan *et al.* (2000)

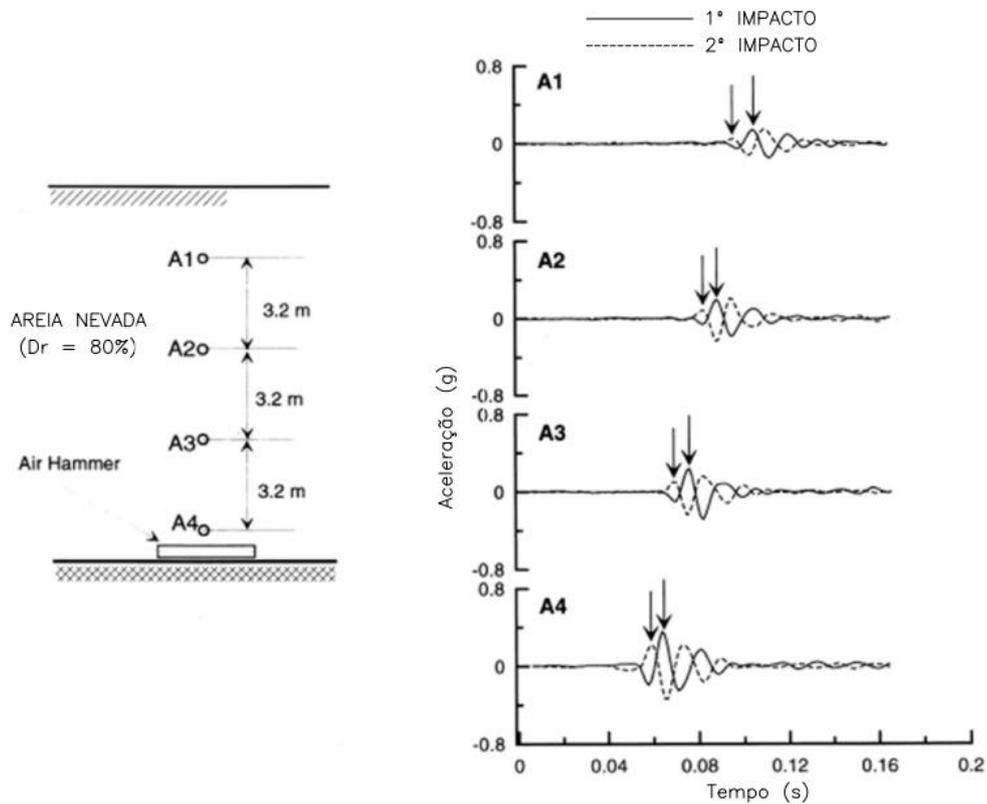


Figura 2-6 - Esquema da posição dos acelerômetros dos ensaios realizados por Arulnathan *et al.* (2000)

Nos ensaios de Arulnahtan (2000), o desenvolvimento do dispositivo para uso em ensaios centrífugos envolveu um processo de tentativas utilizando diferentes tamanhos de *air hammer*, variando comprimentos e diâmetros do cilindro e do pistão, material do pistão e o tipo de alimentação de ar (mecanismo de válvula ou ar comprimido). Cada um desses parâmetros apresenta algum efeito nas ondas produzidas, incluindo sua frequência, magnitude e clareza.

Exemplo deste procedimento de desenvolvimento pode ser encontrado em Arulnathan *et al.* (2000). Uma vez desenvolvido o dispositivo também pode ser utilizado para determinar a velocidade de propagação da onda cisalhante em argilas como utilizado na caracterização realizada por Camelo (2021) utilizando o *air hammer* desenvolvido para a centrífuga de tambor da Universidade de Cambridge.

Madabhushi (2014) aponta que é imperativo a utilização de um sistema de aquisição de dados muito rápido para o sucesso do ensaio com o dispositivo de *air hammer*.

2.1.3. Correlações empíricas

O módulo cisalhante máximo ($G_{\text{máx}}$) é um parâmetro que depende da tensão efetiva e , em meios homogêneos, aumenta com a profundidade. Sendo assim, as correlações empíricas propostas na literatura consideram o efeito da tensão confinante efetiva média (σ'_m) na obtenção dos resultados, sendo determinada conforme a 2:

$$\sigma'_m = \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right) \times \sigma'_v - (\text{kPa}) \quad (2-2)$$

onde:

σ'_m : Tensão confinante efetiva média

K_0 : Coeficiente de empuxo horizontal no repouso ($K_0 = 1 - \text{sen } \emptyset'$)

σ'_v : Tensão vertical efetiva

A relação entre a velocidade da onda cisalhante e a tensão confinante efetiva média proposta por Arulnathan *et al.* (2000) foi determinada através de ensaios centrífugos utilizando o mini *air hammer* sendo descrita pela 3:

$$\frac{V_s}{V_{pw}} = 0,132 \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{0,25} - (m/s) \quad (2-3)$$

onde:

V_s : Velocidade da onda cisalhante

V_{pw} : Velocidade da onda de compressão na água (1.550 m/s)

P_a : Pressão atmosférica

As correlações empíricas para determinação de $G_{m\acute{a}x}$ obtidas por Seed e Idriss (1970), Hardin e Drnevich (1972) e mais recentemente por Oztoprak e Bolton (2013), foram escolhidas para as comparações dos resultados pois foram realizadas através de ensaios centrífugos com *air hammer* em areais, Suas formulações seguem descritas pelas equações 2-4, 2-5 e 2-6, respectivamente.

$$G_{m\acute{a}x} = 1000K(\sigma'_m)^{0,5} - (\text{kPa}) \quad (2-4)$$

sendo:

$G_{m\acute{a}x}$: Módulo cisalhante máximo.

K: Constante que depende da densidade relativa do solo, tendo valor igual a $K = (0,586 + 16,5 \times Dr)$ para o intervalo $30\% \leq Dr \leq 90\%$.

σ'_m : Tensão confinante efetiva média

$$G_{m\acute{a}x} = 3230 \frac{(2,973 - e)^2}{1 + e} \sigma'_m{}^{0,5} - (\text{kPa}) \quad (2-5)$$

sendo:

e: Índice de vazios = 0,664 para DR = 80%, na presente pesquisa

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{5760P_a}{(1 + e)^3} \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{0,49} - (\text{kPa}) \quad (2-6)$$

sendo:

P_a : Pressão atmosférica local, correspondente a 100 kPa

Os valores experimentais de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos em ensaios centrífugos com *air hammer* em areia fofa e densa por Futai *et al.* (2018) seguem apresentados na Figura 2-7. Os resultados foram comparados com as correlações empíricas propostas por Seed e Idriss (1970), Hardin e Drnevich (1972) e Oztoprak e Bolton (2013). Os autores observaram que embora todas as correlações tenham apresentado boa concordância com os valores experimentais do módulo cisalhante máximo, a proposição de Seed e Idriss (1970) subestimou os resultados para a areia fofa, assim como a proposição de Hardin e Drnevich (1972) para a areia compacta. A

formulação proposta por Oztoprak e Bolton (2013) foi a que apresentou o melhor ajuste com os resultados experimentais para ambas as compacidades de areia.

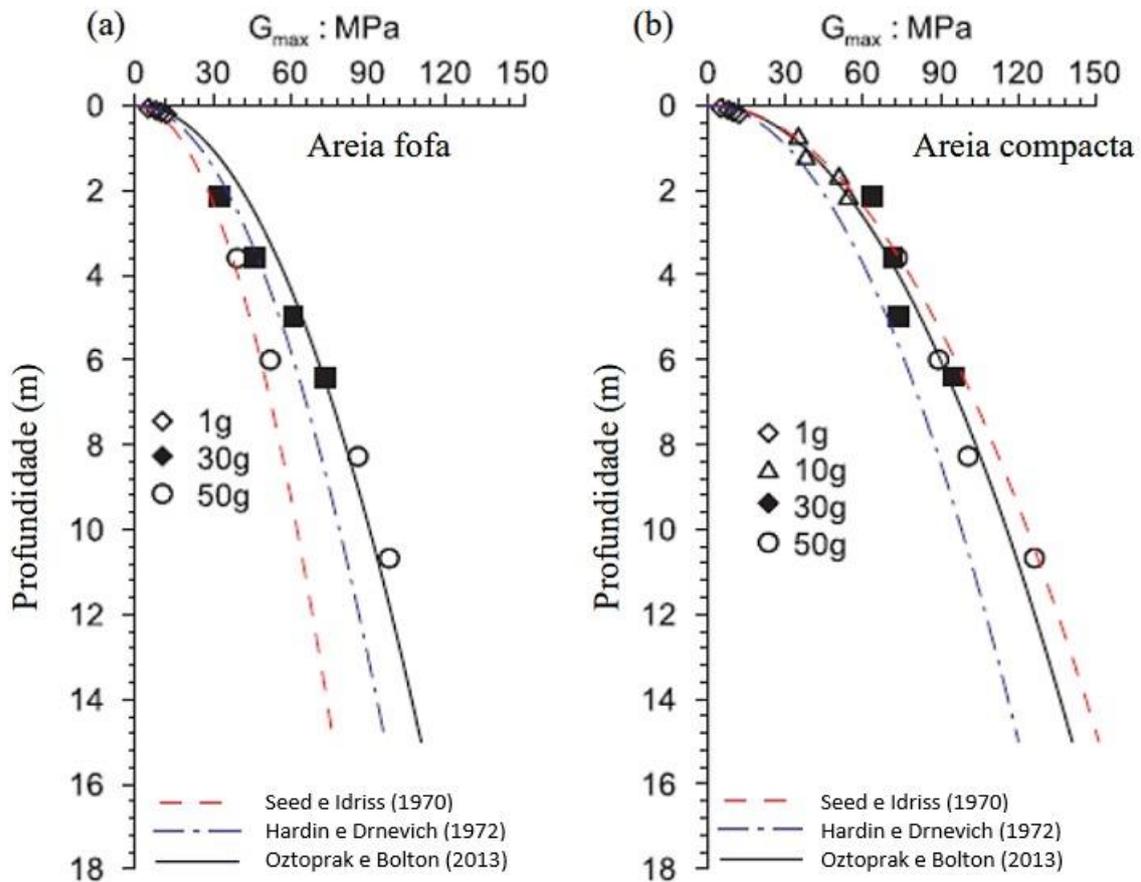


Figura 2-7 - Resultado do módulo cisalhante máximo para (a) areia fofa e (b) areia compacta (FUTAI et al., 2018)

2.2 MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Algumas metodologias de deposição do solo são *moist tamping*, fluidização, pluviação úmida e pluviação seca, cujo objetivo é a obtenção de amostras regulares com boa reprodutibilidade.

A pluviação realizada com o uso de aparelhos é bem aceita na prática técnica, em virtude da possibilidade de replicar o processo de deposição natural desses solos com menor influência de erros humanos. De acordo com Pincus *et al.* (1995), a técnica de deposição de materiais granulares por pluviação é amplamente difundida na reconstituição de amostras de solos em laboratório. A pluviação automática, que será apresentada no item 2.2.1, quando comparada

com a manual, resulta em um elevado grau de uniformidade espacial, tanto em termos da densidade relativa do solo, quanto na distribuição granulométrica.

2.2.1 Pluviação automática

Os pluviadores automáticos (Figura 2-8), em geral, podem se deslocar tanto horizontalmente quanto verticalmente, permitindo a obtenção de camadas de areia regulares. A participação humana no processo de pluviação automática é mínima, normalmente limitada a estabelecer a altura de queda inicial do solo e a determinar a velocidade de deslocamento horizontal e vertical.

Os principais fatores que influenciam a densidade relativa da areia a partir da pluviação são a altura de queda, a uniformidade da “chuva” de areia, as características das partículas e a intensidade da deposição da areia (DAVE e DAsAKA, 2012). Kutter *et al.* (2020) ainda apontam como fator relevante a umidade da areia, devido ao problema da coesão aparente, recomendando que a areia seja seca em estufa.

Segundo Pincus *et al.* (1995), no processo de pluviação automática não é possível atingir densidades relativas entre 70% e 90% sem o uso de peneiras. Já a segregação de partículas é consideravelmente reduzida, tanto nas direções horizontal quanto vertical, visto que a amostra é feita em camadas uniformes, conforme a translação do pluviador.

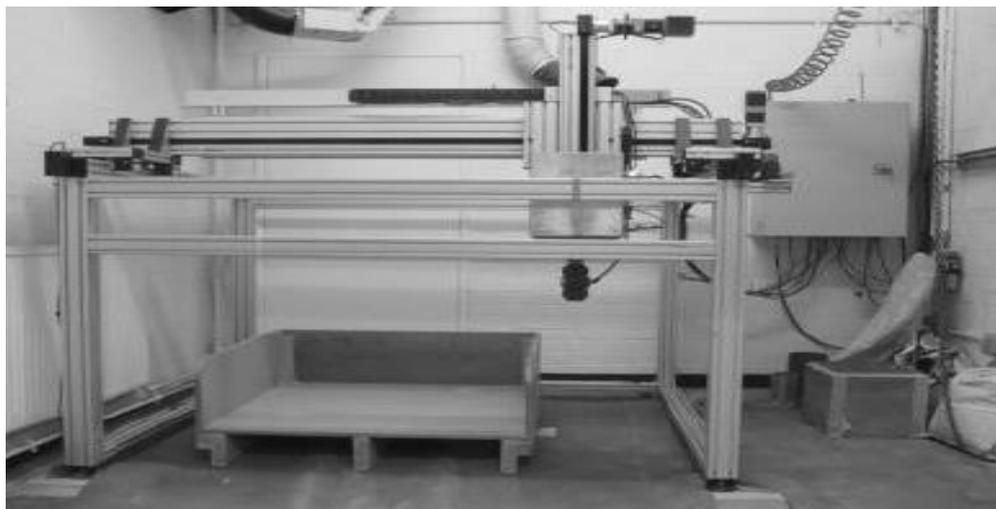


Figura 2-8- Visão ampla de um pluviador automático (MADABUSHI, 2014).

A uniformidade da camada de areia é um dos principais requisitos para garantir uma densidade relativa do material constante em todo o volume, tanto vertical quanto

horizontalmente. Uma das formas de se fazer essa deposição de material é pelo método chamado por Filho (1987) de “chuveiro” (Figura 2-9), que foi inspirado no trabalho de Miura e Toki (1982), cujo dispositivo consiste na presença de peneiras, gerando o efeito de um “chuveiro de areia”.

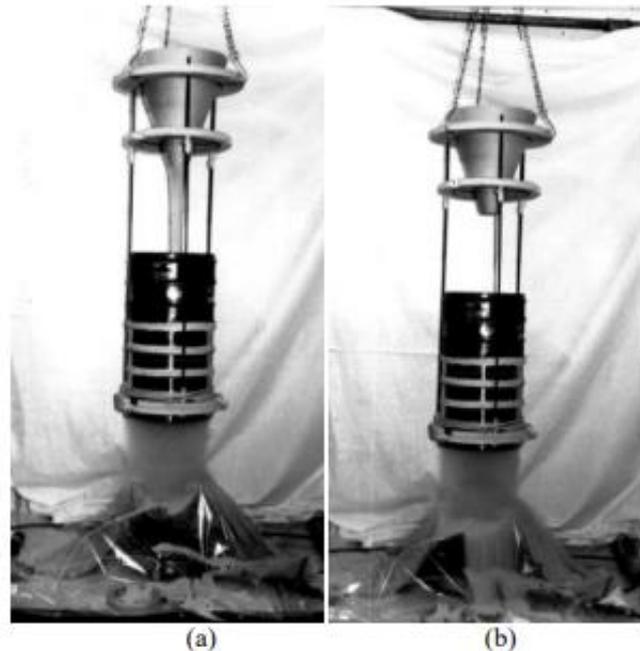


Figura 2-9 – Chuveiro em operação (a) Funil, peneiras e o arcabouço de sustentação, além do fluxo inicialmente concentrado de areia que depois se espalha e produz uma chuva uniforme sobre o molde (b) Chuveiro imediatamente antes do término da operação de moldagem. (FILHO, 1987)

A intensidade de deposição do material arenoso é o peso do solo caindo por unidade de área em determinado período, sendo controlado pela variação da área de abertura por onde o material sai do suporte (PINCUS *et al.*, 1993). Como forma de controlar a intensidade de queda, Kramer (1996), Briaud (2013) e Barros (1997) controlaram a velocidade do movimento do pluviador automático para atingir uma determinada faixa de densidade relativa.

2.3 MODELAGEM CENTRÍFUGA

A modelagem física em centrífuga geotécnica foi iniciada no Brasil em meados da década de 90 com a instalação da primeira centrífuga geotécnica de tambor na COPPE/UFRJ. O equipamento foi instalado em 1995 no novo prédio do Laboratório de Geotécnica (ALMEIDA, 1996). Em 1996 a centrífuga começou a operar, tendo sido os primeiros estudos relacionados ao transporte de metais pesados em solos (GURUNG *et al.*, 1998; ALMEIDA, 2000). Desde então várias pesquisas de mestrado e doutorado vem sendo realizadas com foco,

principalmente, na aplicação Geotécnica e na interação solo-estrutura em problemas *offshore* (energias não renováveis e renováveis). Em 2012 um novo equipamento foi adquirido, desta vez uma centrífuga geotécnica de braço (ALMEIDA *et al.*, 2014), permitindo uma gama maior de tipos de ensaios e pesquisas.

O princípio da modelagem na centrífuga é reproduzir o comportamento de um protótipo em um modelo em escala reduzida N vezes submetido à aceleração radial igual a N vezes g (aceleração da gravidade). Com esta técnica, o peso próprio, as tensões e os processos dependentes da gravidade são corretamente reproduzidos ou antecipados. Assim sendo, a partir de modelos em escala reduzida, pode ser reproduzido o protótipo utilizando-se leis de escala pré-estabelecidas (SCHOFIELD, 1980). Madabhushi (2014) apresenta uma lista de leis de escala (Tabela 1) desenvolvidas para relacionar o comportamento do modelo centrífugo com o comportamento do protótipo.

Tabela 1 - Relação de escala modelo/protótipo (MADABHUSHI, 2014)

Parâmetro	Relação Modelo/Protótipo
Comprimento	$1/N$
Área	$1/N^2$
Volume	$1/N^3$
Massa	$1/N^3$
Tensão	1
Deformação	1
Força	$1/N^2$
Momento Fletor	$1/N^3$
Trabalho	$1/N^3$
Energia	$1/N^3$

Na engenharia geotécnica, uma modelagem centrífuga refere-se à aplicação de um campo gravitacional artificial, maior do que aquele que a Terra possui naturalmente, correspondendo a $1g$, em uma amostra de solo, previamente preparada laboratorialmente, denominada modelo. Caso não houvesse majoração do campo gravitacional, as tensões confinantes submetidas no laboratório seriam muito inferiores às que ocorrem na realidade, de modo que o protótipo – denominação associada ao modelo majorado pela centrífuga – não corresponderia à situação *in situ*. Essa mudança de gravidade faz com que seja possível simular

estados de tensões de grandes obras em modelos de dimensões da ordem de centímetros, além de acelerar alguns processos como o adensamento de uma argila.

Esta amostra de solo submetida à aceleração centrífuga possui uma superfície isenta de tensões e um nível de tensões que aumenta com a profundidade, em uma taxa relacionada à densidade do solo e ao campo de aceleração criado (TAYLOR, 1994). Se o mesmo tipo de solo for utilizado tanto para o modelo quanto para o protótipo, e se o modelo estiver corretamente projetado, então, a uma profundidade h_m , o modelo experimenta o mesmo nível de estresse que o protótipo a uma profundidade h_p , onde $h_p = N \cdot h_m$, sendo N o fator de escala. Este é o princípio básico dos modelos de centrifugação, e a demonstração dessa expressão pode ser encontrada em Taylor (1994) A distribuição da tensão vertical no modelo e a tensão correspondente ao protótipo são mostrados na Figura 2-10.

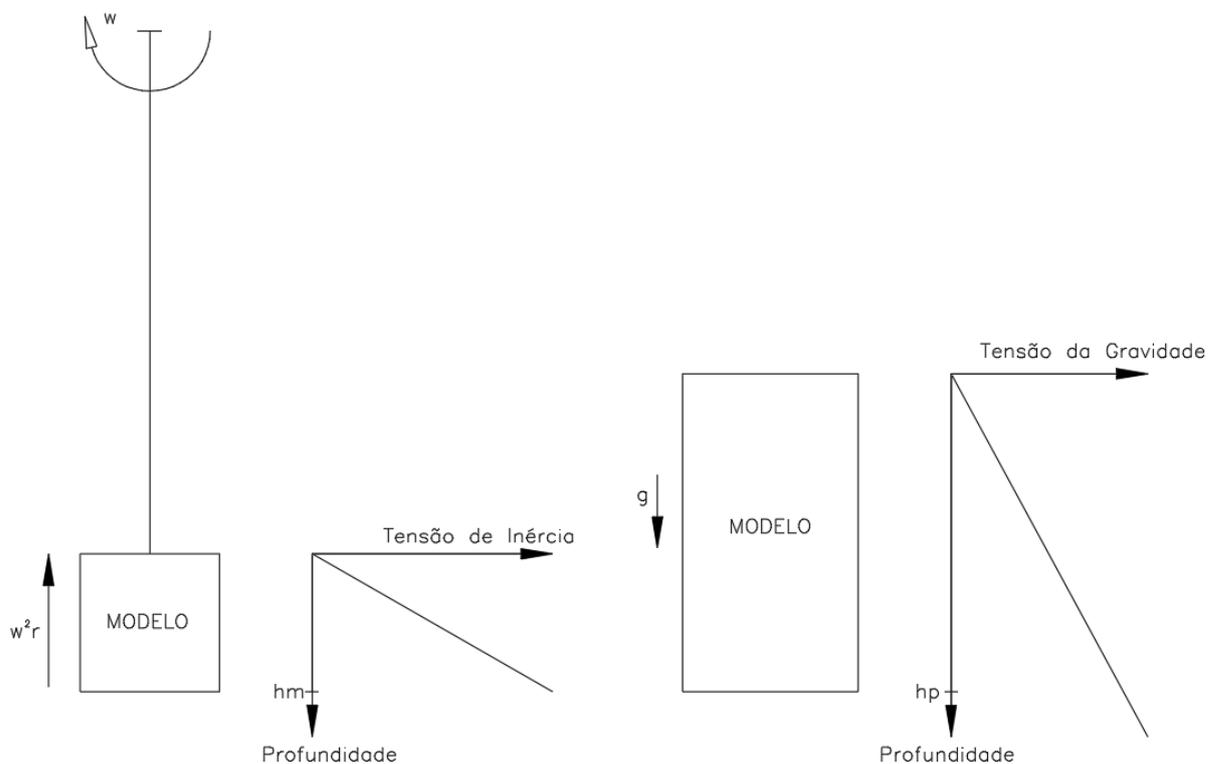


Figura 2-10 - Correspondência entre a tensão inercial em uma modelagem centrífuga induzida pela rotação em torno de um eixo fixo e a tensão gravitacional correspondente no protótipo (TAYLOR, 1994).

2.4 EFEITO DE BORDA

Em um ensaio centrífugo, o efeito de borda refere-se à maneira como as bordas do recipiente (ou molde) influenciam o resultado do comportamento do solo durante o ensaio. Em

outras palavras, o solo próximo às bordas do recipiente pode ter características diferentes do solo no centro do recipiente devido à geometria e restrições impostas pelas bordas.

No ensaio CPT, de acordo com Bolton *et al.* (1999), em areias com densidade relativa elevada, existe a possibilidade de ocorrerem acréscimos na resistência de ponta obtida na cravação próxima da borda de até 30% em comparação a uma cravação mais distante. Ensaio CPT realizados por Ferreira (2021) mostram que a resistência de ponta na borda é da ordem de 16% maior do que realizada no centro da amostra.

Conforme estudos realizados por Bolton e Gui (1999), a relação entre o diâmetro da caixa cilíndrica e o diâmetro do mini CPT deve ser de, no mínimo 40, para minimizar o efeito de borda.

2.5 ENSAIO CPT

Muitas obras realizadas no Brasil são projetadas apenas com as informações obtidas a partir de ensaios SPT (Standard Penetration Test), sendo o CPT (Cone Penetration Test) mais utilizado para obras *offshores* e outras obras especiais (DANZIGER e VELLOSO, 1995).

O procedimento de campo compreende a introdução de uma ponteira cônica no solo, com um ângulo de 60° na ponta, a uma velocidade constante de 20 mm/s. A seção transversal dessa ponteira varia entre 5 e 15 cm², dependendo da finalidade específica (SCHNAID *et al.*, 2012). A resistência de ponta à penetração (q_c) e a resistência de atrito lateral (f_s) do solo são medidos durante o ensaio. Essas resistências são calculadas pela divisão da força vertical total exercida no cone pela sua área projetada horizontalmente (LUNNE *et al.*, 1997).

O ensaio de laboratório chamado "mini CPT em centrífuga" utiliza a técnica de teste de penetração de cone em escala reduzida e é utilizado em centrífugas geotécnicas. Esta técnica é usada para simular as condições do solo sob altas acelerações da gravidade. Isso permite estudar o comportamento geotécnico do solo, podendo melhorar a compreensão da liquefação de areias, comportamento de taludes e estabilidade de fundações em condições sísmicas e outras situações geotécnicas complexas. Tarazona (2015), por exemplo, executou ensaios de caracterização com mini CPT em voo para estudo da interação solo-duto em leito marinho arenoso. É importante ressaltar que as descobertas feitas em escala reduzida devem ser cuidadosamente aplicadas às condições reais de campo. Como resultado, esse tipo de ensaio fornece informações abrangentes

sobre o comportamento do solo em situações específicas e geralmente é usado em conjunto com outros estudos geotécnicos e análises de engenharia.

Em experimentos laboratoriais, têm sido utilizadas versões em miniatura de cones conhecidas como mini CPT. A escolha comum desse dispositivo, conforme destacado por Lunne *et al.* (1997), está associada à realização do ensaio CPT durante a operação da centrífuga. Nesse contexto, é necessário o uso de penetrômetros com diâmetros reduzidos, geralmente encontrados na literatura com uma seção transversal de cerca de 1 cm². Ferreira (2021) desenvolveu um mini CPT específico para as condições dos ensaios a serem realizados na centrífuga geotécnica do LM²C permitindo suportar cargas mais elevadas.

A Figura 2-11 apresenta os resultados da resistência de ponta q_c obtidos através do ensaio de mini CPT executados por Ferreira (2021), com os fatores de escala $N = 50$ e 105 , realizados em amostras de areia quartzosa (QZ).

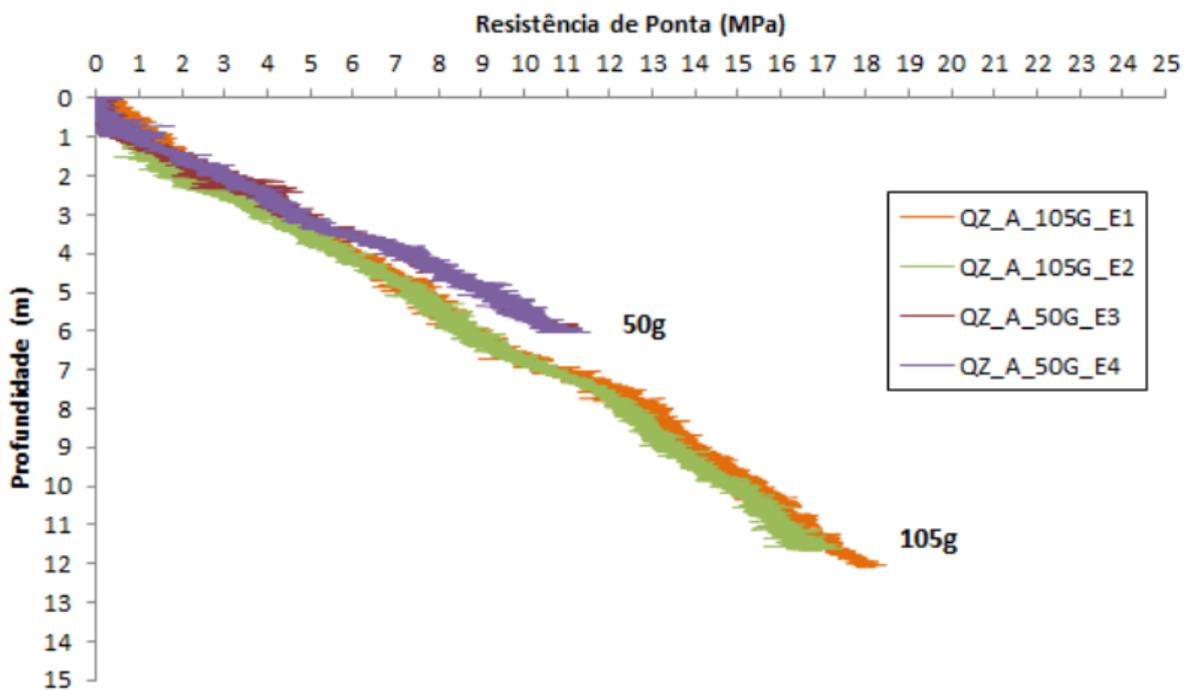


Figura 2-11 - Resistência de ponta obtida através do ensaio mini CPT em areia quartzosa (FERREIRA, 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTAÇÃO

3.2.1 Centrífuga de braço

A centrífuga geotécnica de braço do Laboratório Multiusuário de Modelagem de Centrífuga (LM²C) da COPPE/UFRJ apresenta diâmetro de 1,60 m e capacidade máxima de aceleração de até 300 vezes a aceleração da gravidade correspondente a 638 rpm (ALMEIDA *et al.*, 2014).

A pesquisa de turbinas eólicas *offshore* no qual este trabalho se insere envolve o problema de uma estaca carregada lateralmente que precisa ser analisado em uma abordagem 3D. Para considerar corretamente todos os aspectos envolvidos neste tipo de problema foi utilizada uma caixa cilíndrica confeccionada em alumínio de alta resistência instalada no interior da caixa retangular, com diâmetro interno de 220 mm e altura de 145 mm (Figura 3-1).

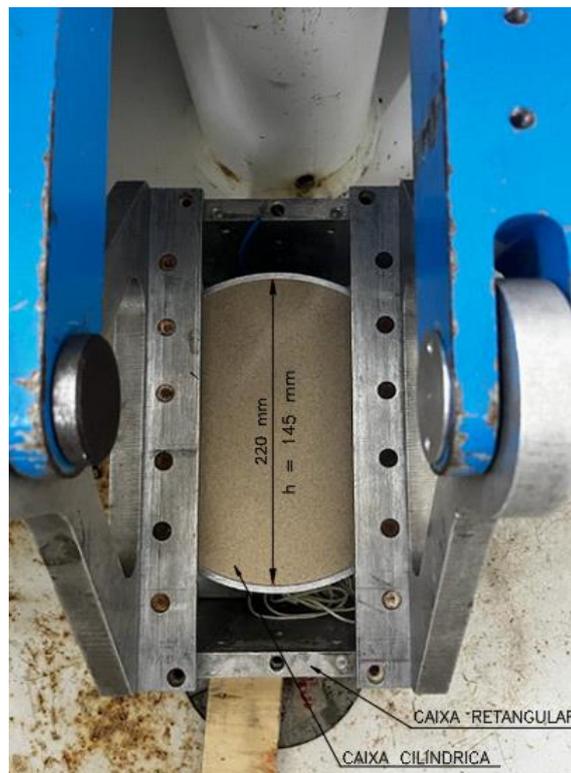


Figura 3-1 - Caixa de suporte para abrigar a amostra de solo pluviada

Conforme reportado por Lemos (2024), foi necessário instalar uma nova estrutura de suporte no interior da centrífuga (Figura 3-2) para fixação do novo computador de bordo

(instalação de novos softwares), do osciloscópio (para aquisição dos sinais dos acelerômetros) e de componentes elétricos, eletrônicos e pneumáticos (para automação e controle dos ensaios).

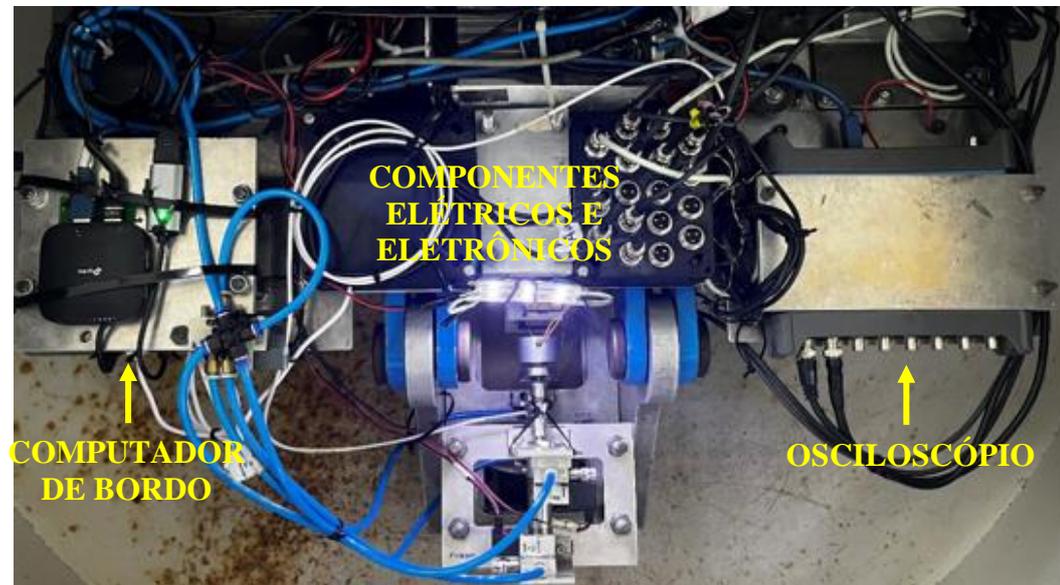


Figura 3-2 - Estrutura de suporte com novos componentes instalados (LEMOS, 2024)

O servo atuador bidirecional da centrífuga mostrado na Figura 3-3 permite a inserção e a retirada de elementos em profundidade e a movimentação radial ao longo do comprimento da caixa retangular. Os atuadores são operacionalizados através do software Easi-V.



Figura 3-3 - Atuador bidirecional

3.2.2 Mini air hammer

Nos estudos geotécnicos a determinação das propriedades mecânicas do solo desempenha um papel fundamental na análise de sua estabilidade e comportamento. Entre as técnicas utilizadas para avaliar o módulo de cisalhamento do solo, o mini *air hammer* vem se destacando como uma abordagem inovadora e eficaz para uso em centrífuga geotécnica.

Tomando como base as experiências da literatura técnica mencionados, o mini *air hammer* desenvolvido foi composto por um cilindro cujas dimensões seguem apresentadas na Figura 3-4. A figura identifica o pistão de teflon com 19 mm de comprimento no interior do cilindro. O impacto devido ao deslocamento interno do pistão ocasiona um leve e rápido movimento do mini *air hammer*, gerando ondas cisalhantes na amostra de areia a serem detectadas pelos acelerômetros. A diferença de tempo entre o impacto de ida e o de volta é de 50 ms.

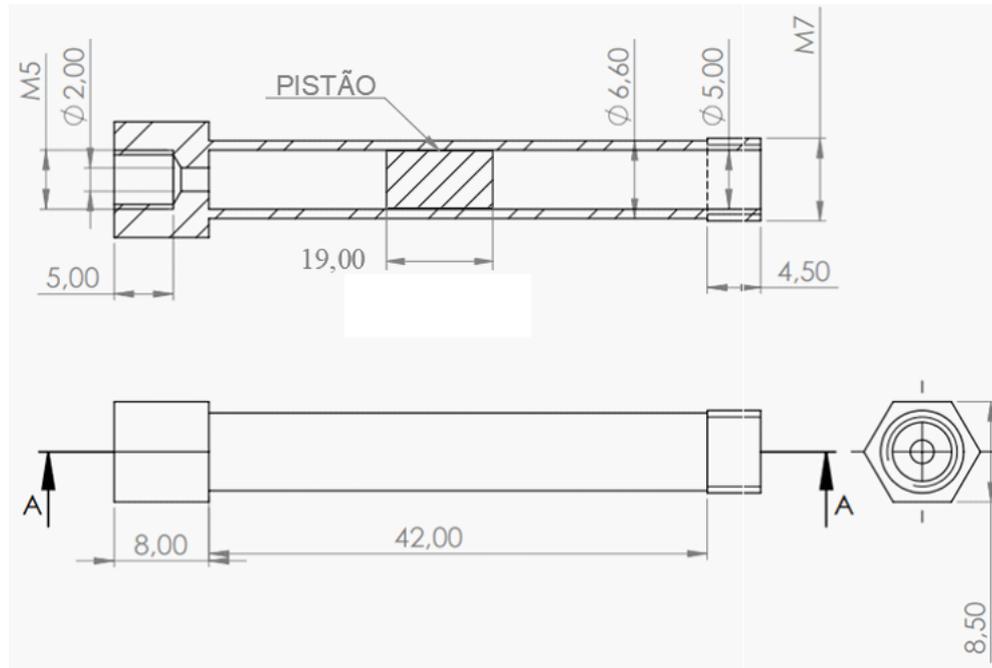


Figura 3-4 – Dimensões do *air hammer* (mm)

O trecho central externo do *air hammer* foi envolto com areia colada com resina epóxi para aumentar o atrito entre o dispositivo e a amostra de areia quartzosa (Figura 3-5), como recomendado por Arulnathan *et al.* (2000).



Figura 3-5 - Areia colada com epóxi na parte central do cilindro do *air hammer*

Para obter uma estimativa do módulo de cisalhamento máximo, os níveis de deformação devem ser pequenos para evitar o comportamento não linear da tensão-deformação no solo. Comportamento essencialmente linear é esperado em areia para deformações de cisalhamento abaixo de cerca de 0,0001 a 0,001% (HARDIN e RICHART, 1963). Para gerar as ondas cisalhantes ao longo da amostra de solo, o ar comprimido passa pelo *air hammer*, forçando o impacto do pistão na outra extremidade do *air hammer*. Conseqüentemente, o *air hammer* se move suavemente no solo, gerando pequenas ondas cisalhantes. A Figura 3-6 apresenta um

esquema dos componentes para a geração do impacto: (1) entrada de ar no solenoide; (2) válvula solenoide Minimach 5/2 da Metal Work acionada pelo Paine de Conexão do software TEO Sys; (3) e (4) mangueiras conectadas as extremidades do *air hammer*. Através de observação dos sinais captados em função da pressão, a calibração da pressão de ar comprimido em 4,0 bar se mostrou adequada à realização dos ensaios finais sendo determinada através de ensaios preliminares.

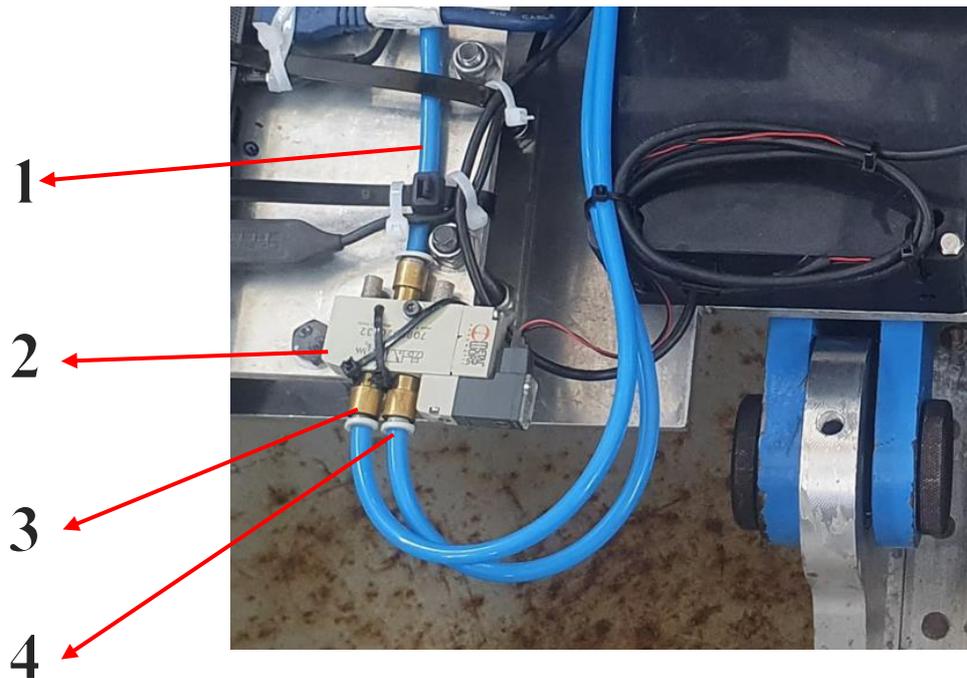


Figura 3-6 – Esquema dos componentes para a geração do impacto

As conexões nas extremidades do *air hammer* com as mangueiras de ar comprimido foram verificadas através de teste de vedação (Figura 3-7) garantindo que a amostra de areia não fosse perturbada pelo vazamento de ar ascendente, utilizando a pressão de ensaio de 4,0 bar.



Figura 3-7 - Teste de vedação do *air hammer*

3.2.3 Acelerômetros

Os acelerômetros são fruto do constante avanço tecnológico na área de sensores e medição de movimentos e incorporam os mais recentes progressos em microeletrônica e processamento de sinais. Esse compromisso com a inovação resultou em um dispositivo capaz de detectar movimentos em múltiplos eixos com uma faixa dinâmica impressionante, o que o torna um instrumento fundamental para a medição em diversas aplicações.

As principais especificações técnicas dos acelerômetros tipo MEMS (*micro electro mechanical system*) modelo ADXL1001 utilizados estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais Especificações do ADXL 1001

Parâmetro	Valores
Faixa de medição	$\pm 100g$
Sensibilidade	20mV/g ($V_{DD} = 5V$)
Sensibilidade perpendicular eixo	$\pm 1\%$
Sensibilidade a temperatura	$0,03\text{g}/^{\circ}\text{C}$ (-10°C a 125°C)
Zero-g (V_0)	$\frac{V_{DD}}{2}$
Densidade de ruído	$\frac{30\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Frequência de ressonância	21kHz

O modelo ADXL1001 possui um único eixo de medição e apresenta como principais características densidade de ruído ultrabaixa, sensibilidade estável e repetível, sendo imune a choques externos de até $10.000g$, e dimensões reduzidas de $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1,80\text{ mm}$.

Os acelerômetros MEMS convertem uma aceleração medida em um sinal elétrico de saída, sendo necessária a aplicação de uma tensão para seu funcionamento. Sob uma

configuração de terminação única, eles produzirão um sinal constante em zero g, denominado tensão zero g (V_0). A medição de aceleração é obtida então através da seguinte equação 2-7:

$$a_n = (V_n - V_0) \times C_F \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (2-7)$$

sendo:

a_n = aceleração aplicada na direção do sensor

V_n = tensão medida devido à aceleração do sensor

C_F = fator de calibração

3.2.4 Osciloscópio

A progressão das ondas cisalhantes no solo geradas pelo *air hammer* são captadas pelos MEMS e os sinais registradas no osciloscópio digital modelo PicoScope 4824A da série 4000A da Pico Technology com 8 canais analógicos de alta resolução. O osciloscópio apresenta interface com o software PicoScope 7 com visualizações no domínio do tempo e no domínio da frequência. Os sinais foram captados no domínio do tempo e armazenados para posterior análise e apresentação no Capítulo 4.

A Figura 3-8 mostra a disposição dos acelerômetros fixados na estrutura de suporte instalada na caixa cilíndrica. O acelerômetro superior (mais próximo do topo da caixa cilíndrica) se encontra na primeira linha, em seguida, o acelerômetro intermediário na segunda linha e na terceira linha fica o acelerômetro mais próximo do *air hammer*. Cada acelerômetro está relacionado a um canal do osciloscópio apresentado pela interface com o software PicoScope 7. O Canal “A” capta o sinal do acelerômetro superior, o Canal “B” capta o sinal do acelerômetro intermediário e o Canal “C” capta o sinal do acelerômetro inferior.

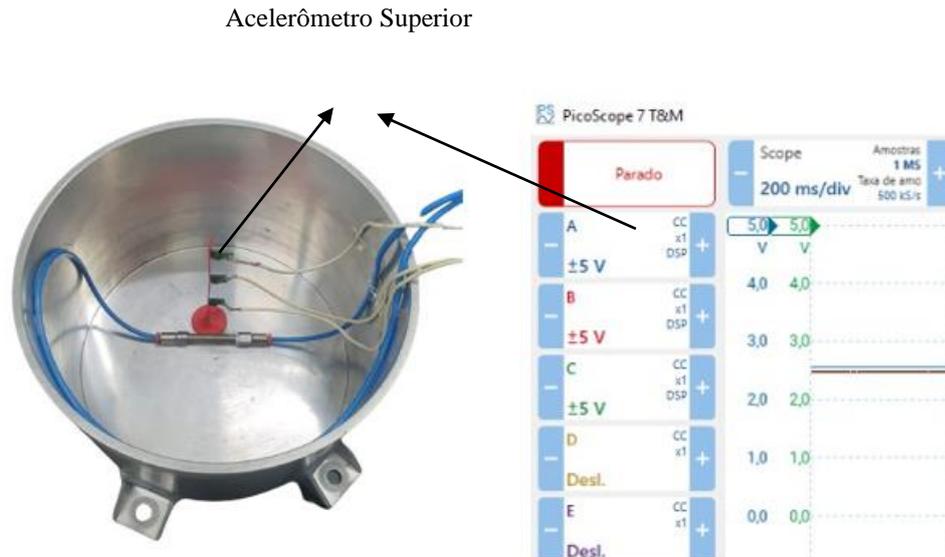


Figura 3-8 - Conexão entre os acelerômetros e a interface do osciloscópio pelo software PicoScope 7

A configuração do osciloscópio para a aquisição de dados foi a seguinte: frequência de 1 Hz, taxa amostral de 500 ks/s, visualização média do gráfico, sem a utilização de trigger e divisão de 200 ms/div.

3.2.5 Célula de Carga

Nos ensaios de penetração com mini CPT o registro de força foi realizada utilizando a célula de carga da série LCM202 modelo métrico da Omega Engineering com capacidade de 5.000 N (Figura 3-9). Foi realizada a aferição das constantes de calibração da célula de carga utilizando um sistema que permite o carregamento e descarregamento do sensor. A metodologia de calibração consistiu na aplicação de vários ciclos de carga e descarga, com intervalos de estabilização, sendo correlacionados com a variação da tensão elétrica medida pelo sistema de aquisição de dados LogLab.



Figura 3-9 - Célula de carga de 5000 N utilizada nos ensaios de CPT

Durante a execução do ensaio CPT, os dados da força são registrados pelo software LogLab (Figura 3-10), configurado para a taxa de aquisição de 1kHz (1.000 amostras/segundo). Os dados capturados em BITS são armazenados e salvos para posterior transformação em tensão, processamento e análise.

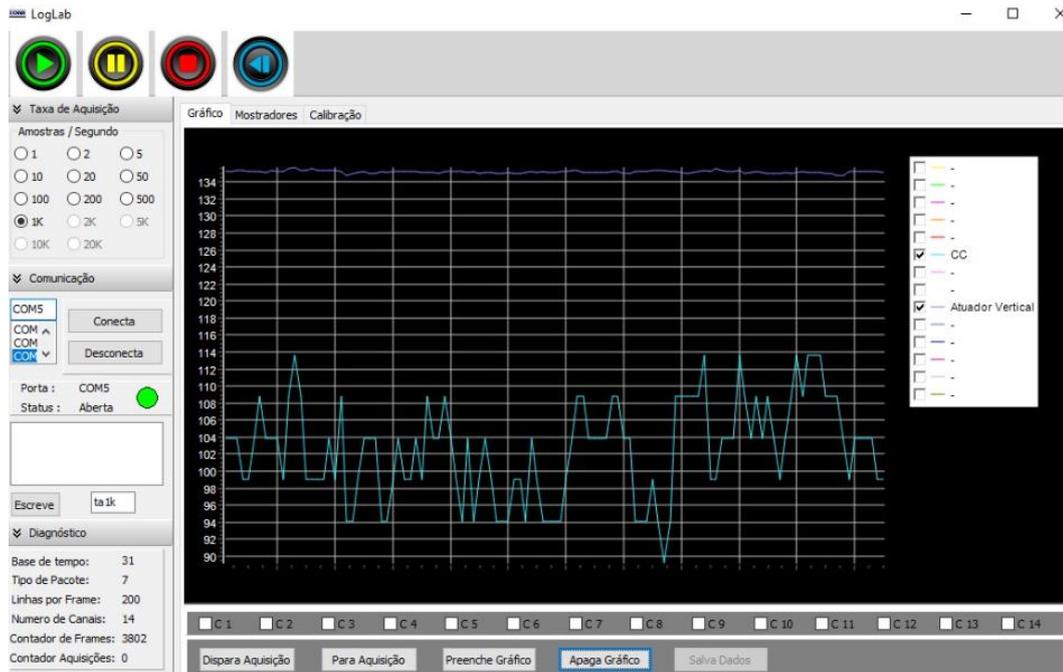


Figura 3-10 - Software LogLab com a aquisição dos dados

3.2 SOLO

3.2.6 Caracterização e preparação da areia

O solo utilizado nas pesquisas foi uma areia quartzosa coletada na cidade de Niterói, no Rio de Janeiro, oriunda da Praia de São Francisco, identificada no presente trabalho como QZ. Os principais índices e parâmetros da areia QZ foram obtidos por Gomes (2020) e seguem apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Índices físicos da areia quartzosa (GOMES, 2020)

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Qz
Índice de vazios máximo	$e_{máx}$	-	0,915
Índice de vazios mínimo	$e_{mín}$	-	0,602
Peso específico máximo	$\gamma_{máx}$	kN/m ³	16,47
Peso específico mínimo	$\gamma_{mín}$	kN/m ³	13,78
Peso específico para DR=80%	γ	kN/m ³	15,85
Densidade dos grãos	G_s	-	2,638
Coefficiente de não-uniformidade	-	-	1,90
Diâmetro médio das partículas	D_{50}	mm	0,18
Ângulo de atrito interno ($\sigma_c = 100kPa$)	\emptyset	graus	40,6

A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os valores dos módulos cisalhantes máximos obtidos respectivamente através de ensaios de coluna ressonante e *bender elements* executados por Gomes (2020) na areia QZ para as tensões confinantes (σ_c) de 50 kPa e 100 kPa.

Tabela 4 - Valores dos módulos cisalhantes máximos de areias quartzosas em cada tensão confinante obtidos através de ensaios de coluna ressonante realizados por Gomes (2020)

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Qz
Módulo cisalhante ($\sigma_c = 50kPa$)	$G_{máx}$	MPa	53,80
Módulo cisalhante ($\sigma_c = 100kPa$)	$G_{máx}$	MPa	98,40

Tabela 5 - Valores dos módulos cisalhantes máximos de areias quartzosas em cada tensão confinante obtidos através de ensaios de *bender elements* realizados por Gomes (2020)

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Qz
Módulo cisalhante ($\sigma_c = 50kPa$)	$G_{máx}$	MPa	81,97
Módulo cisalhante ($\sigma_c = 100kPa$)	$G_{máx}$	MPa	95,89

As amostras utilizadas nos ensaios passaram por três etapas de preparação: (i) peneiramento, (ii) lavagem e (iii) secagem. O processo de peneiramento tem como objetivo a remoção da matéria orgânica e os finos existentes, para obtenção da fração de areia desejada para o estudo. Essa etapa consistiu na exclusão de todas as partículas retidas na peneira #60 (abertura 0,250 mm), em sequência lavada na peneira #200 (abertura 0,074 mm) da série ASTM 2487 (2017) e seca em estufa a 110 °C por 24 horas. Dessa forma, garantindo a uniformidade da areia, a segregação de partículas é bastante reduzida durante a construção das amostras por pluviação, melhorando a repetibilidade dos resultados dos ensaios executados, possibilitando, assim, a comparação dos mesmos (SANTOS, 2015). Além da pluviação de areia, outro fator importante é o de arrasamento e transporte da amostra com os equipamentos inseridos para que os cabos de conexão não perturbem o solo e por isso, esses cabos devem ser fixados na caixa cilíndrica com fitas adesivas tomando todas as precauções possíveis.

A curva granulométrica obtida por Gomes (2020) é apresentada na Figura 3-11. Gomes (2020) verificou que o coeficiente de não uniformidade da areia quartzosa (CNU) é menor que

5, sendo considerado um material uniforme e, além disso, é considerado bem graduado, de acordo com o coeficiente de curvatura (CC) cujo valor está entre 1 e 3.

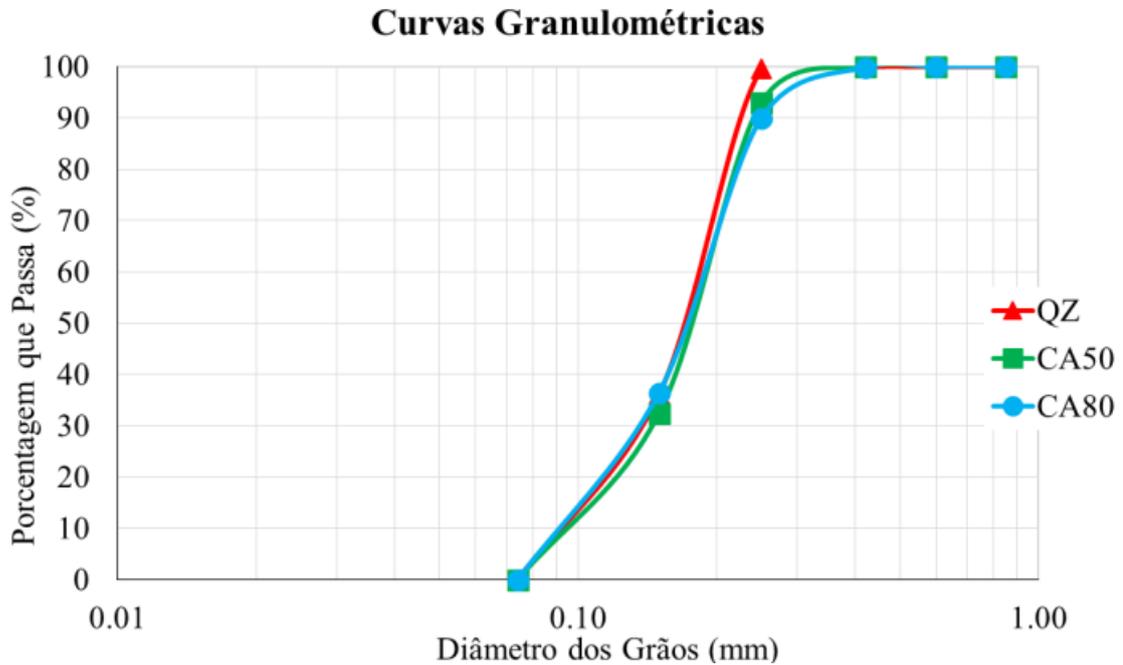


Figura 3-11 - Análise granulométrica da areia quartzosa (GOMES, 2020)

Na preparação da caixa cilíndrica, os acelerômetros MEMS foram fixados a uma estrutura de suporte flexível visando reduzir as incertezas relacionadas às distâncias entre eles, porém sendo o mais fino possível para evitar a influência na propagação das ondas (Figura 3-12). A estrutura de suporte foi fabricada em impressora 3D, sendo composta de filamentos de PLA (*polylactic acid*), um termoplástico biodegradável de origem natural e de fontes renováveis. O suporte apresenta 125 mm de altura e 2 mm de espessura.

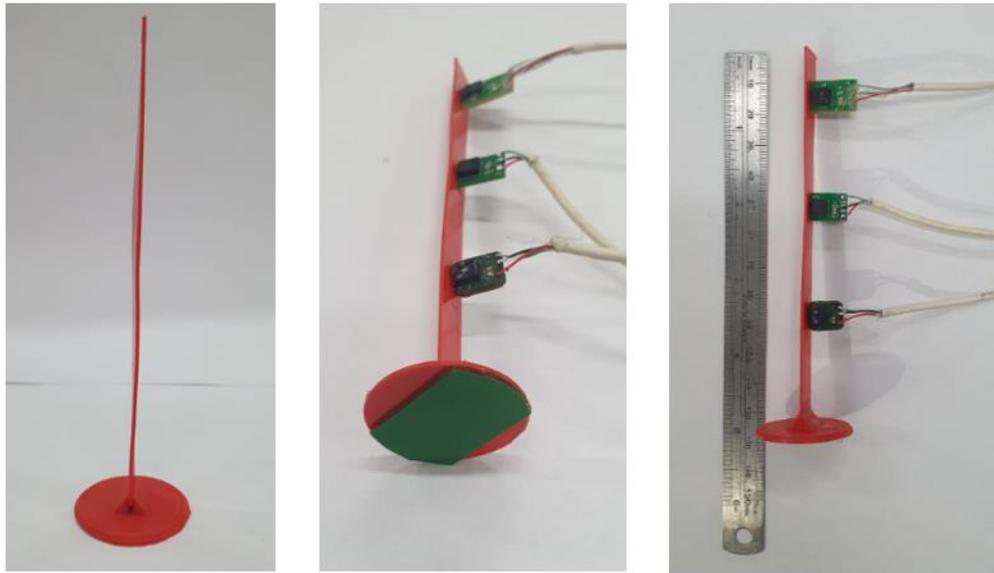


Figura 3-12 – Suporte para os acelerômetros

Conforme os estudos realizados por Ferreira (2021), a estrutura de suporte dos acelerômetros foi fixada ao fundo da caixa cilíndrica, a 50 mm do centro da caixa cilíndrica nos ensaios tipo MB, apresentado na Figura 3-13 e no centro da caixa cilíndrica nos ensaios tipo MC, apresentado na Figura 3-14. Baseado nas posições dos acelerômetros nos estudos mencionados de Arulnathan (2000), os MEMS ficaram dispostos, nas profundidades de 34 mm, 69 mm e 106 mm, em relação ao nível da superfície do solo para a montagem do tipo MB. Os acelerômetros, na montagem tipo MC, ficaram dispostos a 34 mm, 69 mm e 104 mm a partir da superfície do solo. O *air hammer* foi posicionado na base da caixa cilíndrica abaixo dos acelerômetros, apenas com as mangueiras de ar comprimido fixadas na lateral da caixa cilíndrica, estando finalizada a montagem dos dispositivos para seguir para a etapa de pluviação.

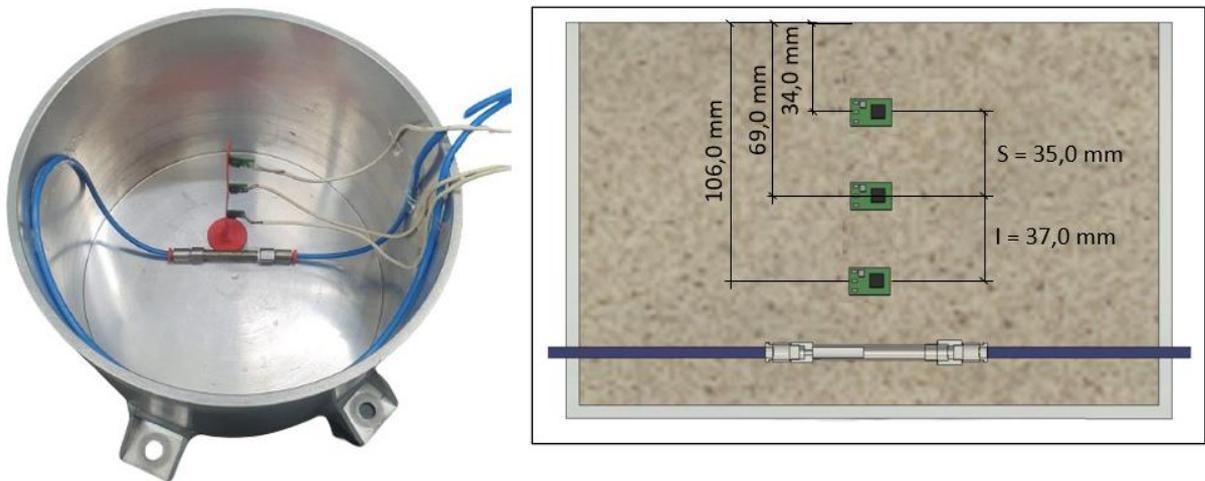


Figura 3-13 - Montagem tipo MB, $S = 35,0$ mm e $I = 37,0$ mm

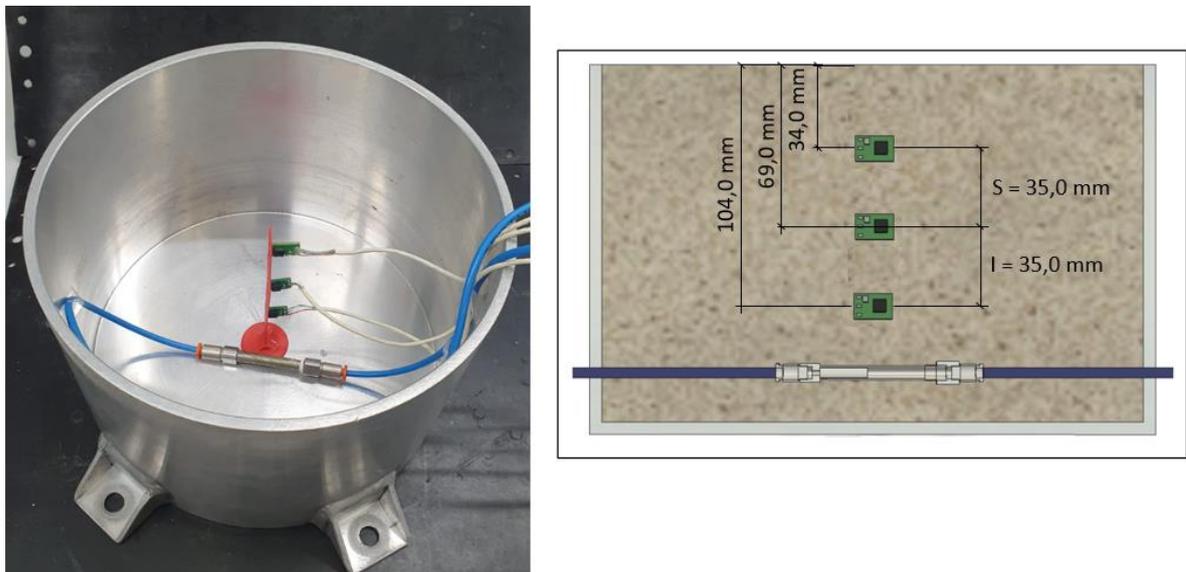


Figura 3-14 - Montagem tipo MC, $S = 35,0$ mm e $I = 35,0$ mm

3.2.7 Calibração do pluviador automático

O pluviador automático desenvolvido por Ferreira (2021) para uso no Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM²C) permitiu a preparação de amostras de areia semelhantes com diferentes densidades relativas e boa repetibilidade. O pluviador (Figura 3-15) conta com 5 peneiras de tamanhos distintos, com suas malhas dispostas em um ângulo de 45 graus entre duas peneiras consecutivas. Além da utilização das peneiras, cantoneiras de

alumínio, com diferentes tamanhos de aberturas para a passagem do solo foram testadas pelo autor para obtenção da densidade relativa requerida de $80\% \pm 1\%$.

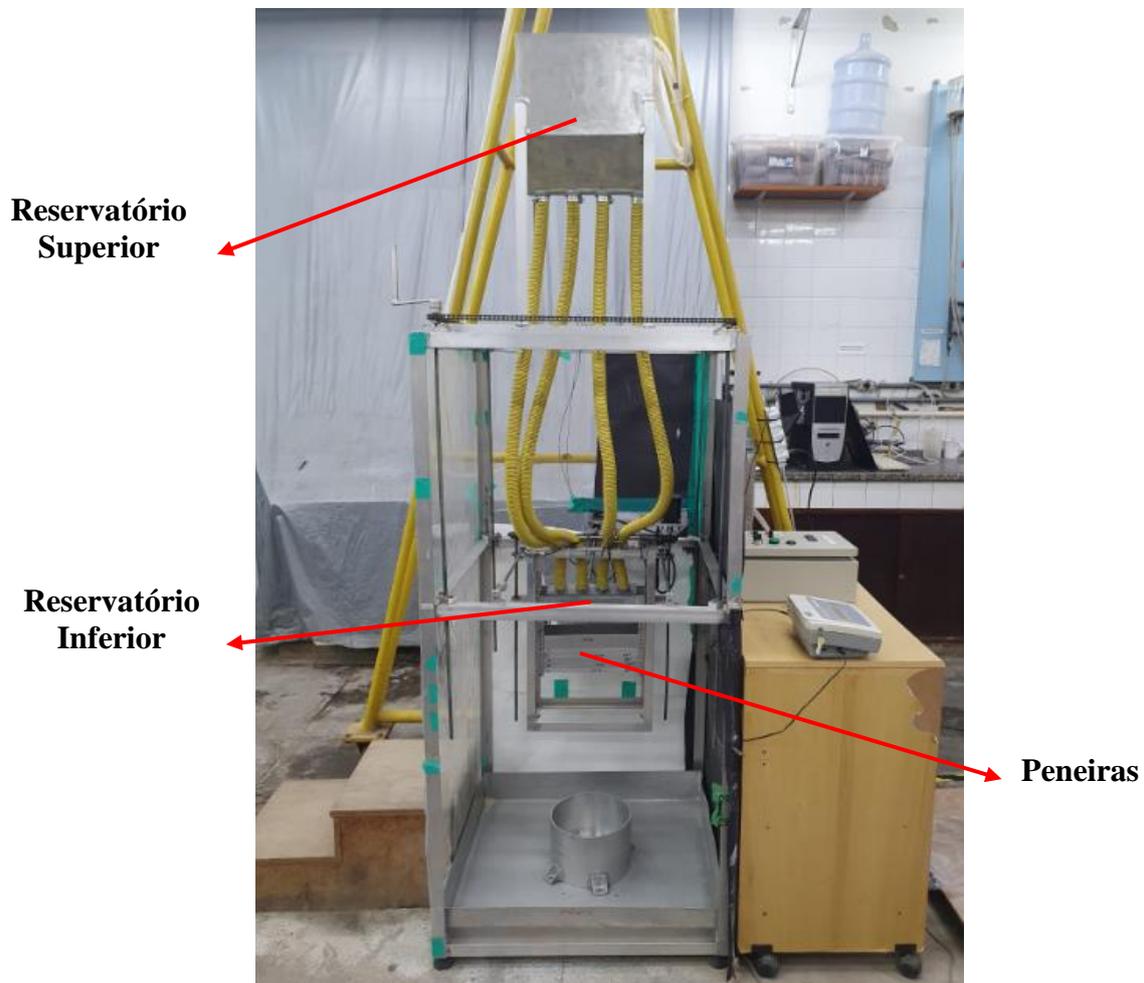


Figura 3-15 - Pluviador automático do Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga (LM²C)

A inclusão dos dispositivos para o ensaio *air hammer* levou à necessidade de recalibração do pluviador automático realizado por Ferreira (2021) para obtenção de densidade relativa de $80\% \pm 1\%$ requerida nos ensaios dinâmicos de fundações de TEO. Foram necessárias diversas preparações preliminares e ajustes no *setup*, envolvendo a confecção de diversas estruturas de suporte para os acelerômetros até que se obtivesse a nova configuração para o processo de preparação das amostras e *setup* final dos dispositivos para o ensaio *air hammer* no interior da caixa cilíndrica.

Antes de iniciar o procedimento de pluviação para preparação das amostras são requeridas as seguintes verificações:

1. Nas conexões entre o reservatório superior e inferior e os tubos de PVC;

2. No nivelamento das peneiras cilíndricas utilizando um nível de bolha (Figura 3-16);
3. Nos comandos de velocidade horizontal e de passo vertical.



Figura 3-16 - Nivelamento das peneiras do pluviador automático

As novas configurações obtidas na calibração do pluviador para obtenção da densidade relativa requerida incluindo os dispositivos para o ensaio air hammer são: (a) altura de queda de 30 cm (Figura 3-17); (b) velocidade horizontal de 6,0 mm/s e (c) o passo vertical de 18 mm.

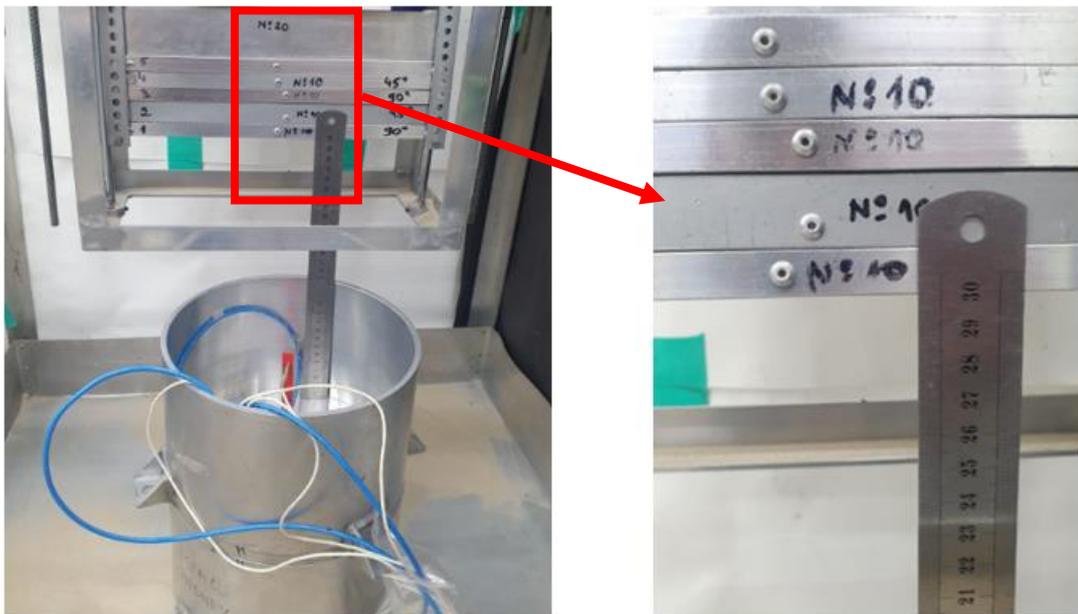


Figura 3-17 - Marcação da altura inicial de 30 cm medidos do fundo da caixa cilíndrica até a face inferior da última peneira

Após a pluviação da areia é realizado o arrasamento da amostra para a retirada do excesso de material (Figura 3-18). A densidade relativa média de cada amostra é definida a partir da determinação da massa e volume da amostra de areia. A massa da amostra é obtida de seu peso, com o uso de uma balança com precisão de 1 grama. O volume da amostra é obtido considerando as dimensões internas da caixa cilíndrica e da altura da amostra. A densidade da areia é calculada dividindo-se a massa obtida pelo volume da amostra. Este valor é comparado com os valores de densidade máxima e mínima obtidas a partir dos ensaios de densidade máxima e mínima, permitindo obter a densidade relativa média da amostra de areia.

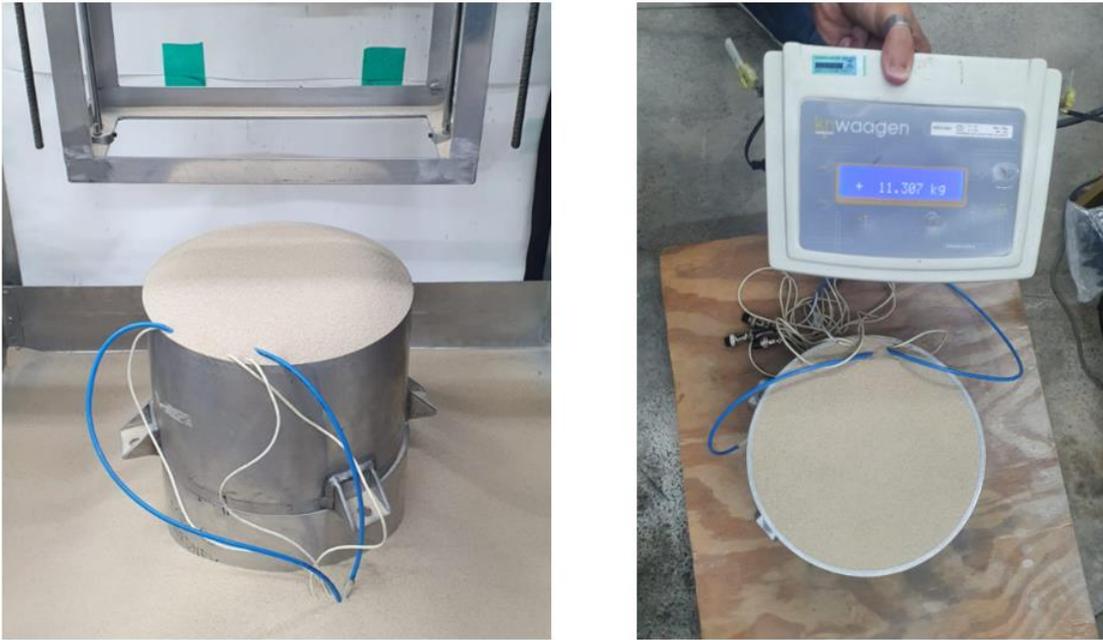


Figura 3-18 - Amostra logo após a pluviação e após o arrasamento

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O fator de escala “N” foi determinado em função das rotações aplicadas (184 rpm, 260 rpm, 319 rpm e 381 rpm) e do braço de alavanca ($r = 679,67$ mm) entre o centro de massa da amostra e o eixo de rotação da centrífuga, sendo apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Fator de escala “N” relacionado com as velocidades angulares ensaiadas

Velocidade angular (rpm)	Fator de escala
184	26
260	51
319	77
381	110

3.3.1 Mini air hammer

O ensaio *air hammer* consiste basicamente em gerar ondas de cisalhamento no solo com nível de deformações dentro do regime linear elástico, obtendo assim, a velocidade média da onda cisalhante (V_s) nas regiões I e S (vide Figura 3-13 e Figura 3-14), permitindo a

determinação do módulo cisalhante máximo ($G_{\text{máx}}$). A pressão estabelecida para o impacto do pistão de teflon interno, gerando, conseqüentemente, a movimentação do *air hammer*, foi de 4,0 bar, com uma diferença de 50 ms entre o impacto de ida e o de volta.

A Tabela 7 apresenta a programação dos 4 ensaios utilizando a montagem tipo MB e 2 ensaios com a montagem tipo MC. Para obtenção da velocidade da onda cisalhante em diferentes profundidades em cada amostra foram realizados ensaios com diferentes acelerações/fatores de escala. Os ensaios foram realizados em ordem decrescente de aceleração: 110g, 77g, 51g e 26g. Ao final dos ensaios de *air hammer* foi realizado o ensaio de mini CPT na amostra a 110g.

Tabela 7 - Programação de ensaios com *air hammer*

Identificação da Amostra	Identificação do Ensaio	Montagem Air Hammer	Posição Ensaio CPT	Fator de Escala N
1	EA1_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	110 (381 rpm)
	EA1_MB_77	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	77 (319 rpm)
	EA1_MB_51	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	51 (260 rpm)
	EA1_MB_26	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	26 (184 rpm)
2	EA2_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	110 (381 rpm)
	EA2_MB_77	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	77 (319 rpm)
	EA2_MB_51	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	51 (260 rpm)
	EA2_MB_26	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	26 (184 rpm)
3	EA3_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	110 (381 rpm)
	EA3_MB_77	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	77 (319 rpm)
	EA3_MB_51	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	51 (260 rpm)
	EA3_MB_26	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	26 (184 rpm)
4	EA4_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	110 (381 rpm)
	EA4_MB_77	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	77 (319 rpm)

	EA4_MB_51	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	51 (260 rpm)
	EA4_MB_26	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)	26 (184 rpm)
5	EA5_MC_110	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	110 (381 rpm)
	EA5_MC_77	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	77 (319 rpm)
	EA5_MC_51	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	51 (260 rpm)
	EA5_MC_26	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	26 (184 rpm)
6	EA6_MC_110	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	110 (381 rpm)
	EA6_MC_77	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	77 (319 rpm)
	EA6_MC_51	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	51 (260 rpm)
	EA6_MC_26	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)	26 (184 rpm)

3.3.2 Mini CPT

O ensaio CPT foi realizado com o objetivo de avaliar a repetibilidade da amostra de solo preparada pela metodologia de pluviação automática desenvolvida por Ferreira (2021) para obtenção da densidade relativa de $80 \pm 1\%$.

A programação de ensaios segue apresentada na Tabela 8 contemplando a realização de 4 ensaios com a montagem tipo MB e 2 ensaios com a montagem tipo MC.

Tabela 8 - Programação de ensaios com mini CPT

Identificação da Amostra	Identificação do Ensaio	Montagem <i>Air Hammer</i>	Posição Ensaio CPT
1	ECPT1_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)
2	ECPT2_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)
3	ECPT3_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)
4	ECPT4_MB_110	Deslocado do centro 50 mm (tipo MB)	Centro da amostra (tipo MB)
5	ECPT5_MC_110	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)
6	ECPT6_MC_110	Centro da amostra (tipo MC)	Deslocado do centro 50 mm (tipo MC)

O CPT desenvolvido por Ferreira (2021) é composto por um pequeno cone com área de 1 cm², diâmetro de 12 mm, comprimento de haste 152 mm e ângulo de ponta do cone de 60°, conforme mostrado na Figura 3-19. Os ensaios mini CPT foram conduzidos com velocidade de cravação constante de 10 mm/s até que fosse atingida a profundidade de 120 mm.

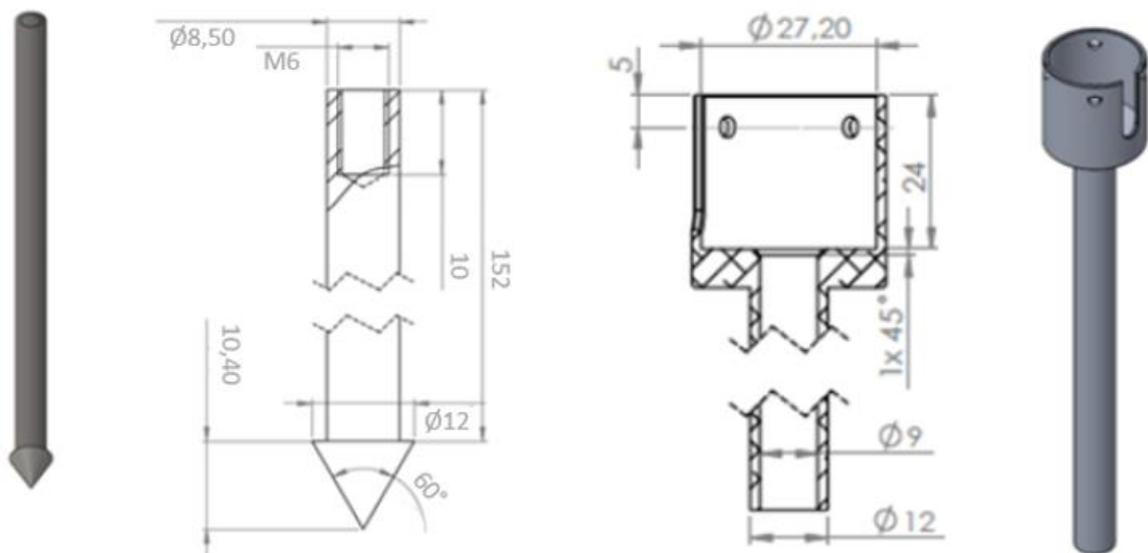
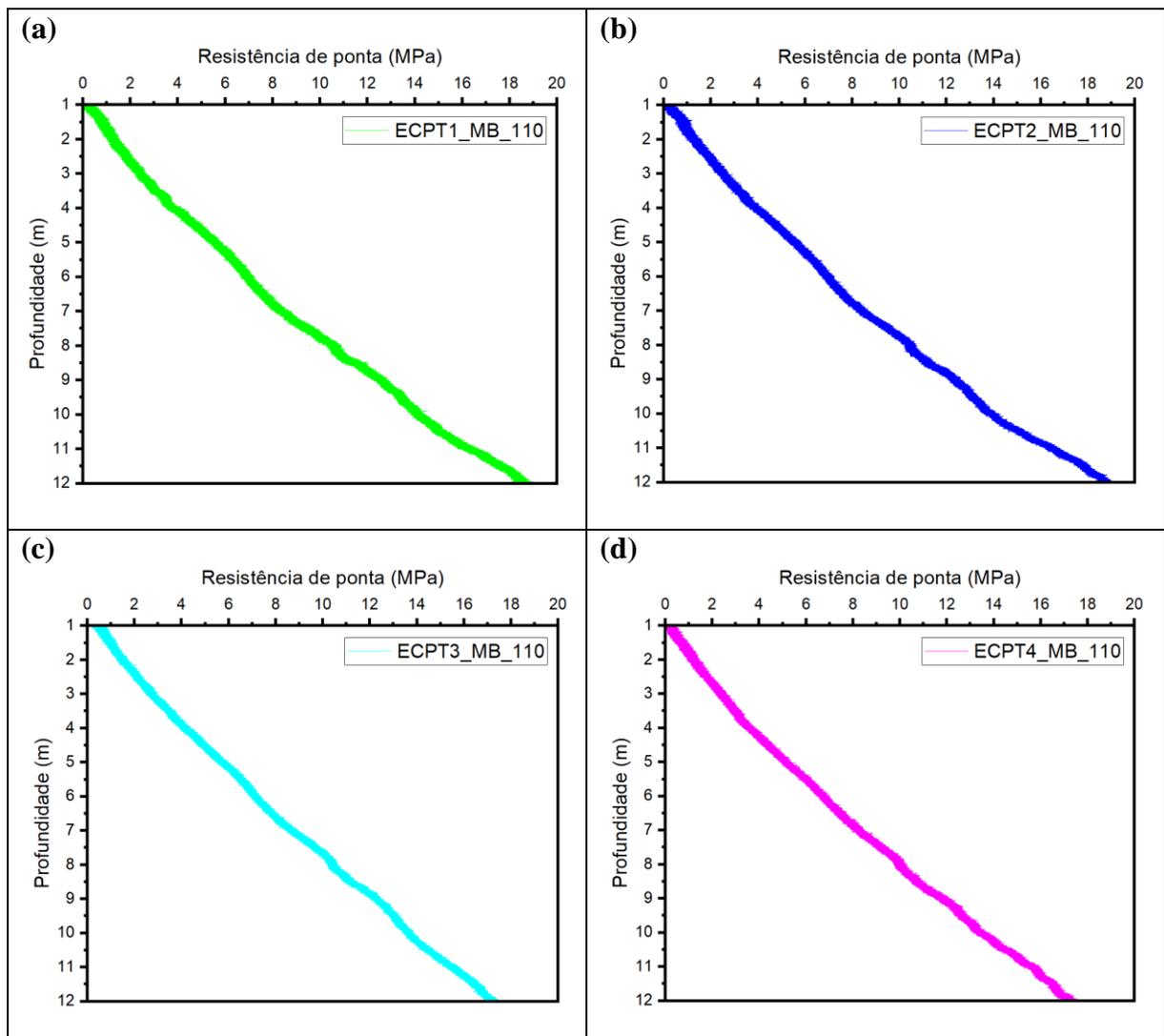


Figura 3-19 - Projeto do mini CPT utilizado (mm)

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIO MINI CPT

Os ensaios com o mini CPT foram realizados após os ensaios mini *air hammer* de forma a não perturbar previamente a amostra e alterar a rigidez inicial do solo. Os resultados dos ensaios para a montagem tipo MB são apresentados nas Figura 4-1 (a), (b), (c) e (d) e os resultados dos ensaios para a montagens tipo MC nas Figura 4-1 (e) e (f).



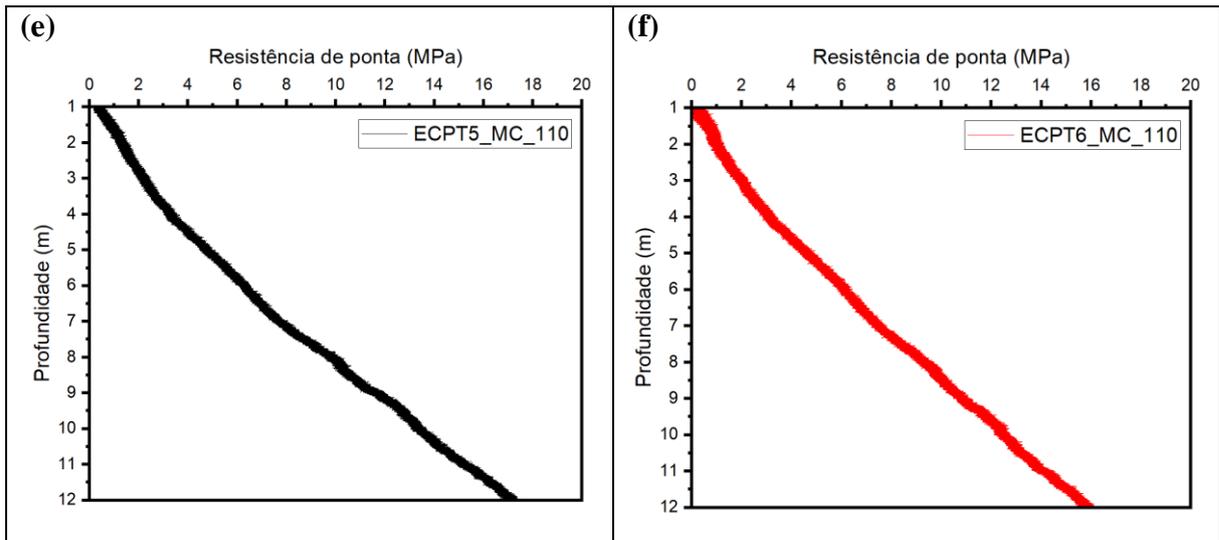


Figura 4-1 - Resultados do ensaio mini CPT a) ECPT1_MB_110, b) ECPT2_MB_110, c) ECPT3_MB_110, d) ECPT4_MB_110, e) ECPT5_MC_110, f) ECPT6_MC_110

A Figura 4-2 apresenta os resultados de todos os ensaios mini CPT executados. A linearidade da resistência de ponta (q_c) com a profundidade indica que as amostras de solo apresentam comportamento similar permitindo validar a metodologia de pluviação automática adotada. Também é possível referendar que o método de pluviação oferece boa repetibilidade na preparação das amostras de solo. A discrepância no trecho final dos ensaios, além de 10,0 m, pode estar associada ao duplo efeito de borda, da lateral e do fundo da caixa cilíndrica.

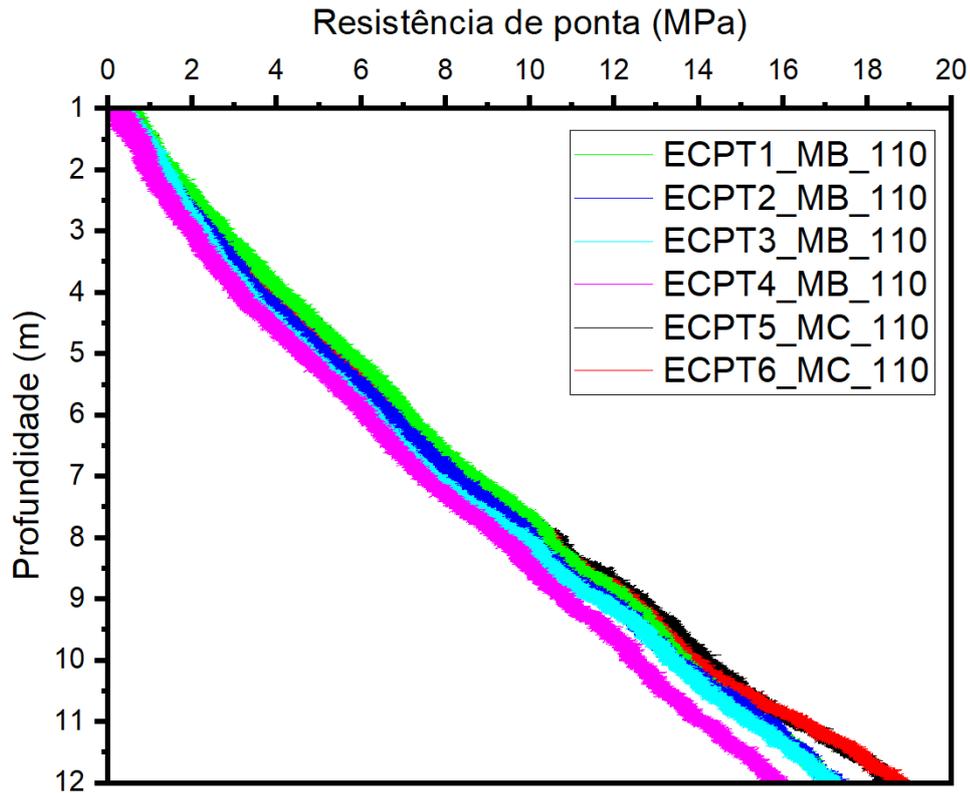


Figura 4-2 - Resistência de ponta (q_c) x Profundidade dos ensaios de mini CPT

Os resultados obtidos nos ensaios CPT indicam que os ensaios de *air hammer*, mesmo para diferentes amostras de areia, devem apresentar variação reduzida entre si para uma mesma camada.

4.2 ENSAIOS MINI AIR HAMMER

Existem dois principais métodos para determinação da velocidade de propagação da onda cisalhante no domínio do tempo: correlação cruzada (*cross-correlation*) e pico a pico (*peak to peak*) (MARSHALL *et al.*, 2018).

A análise pico a pico torna-se simples pois, a identificação de características distintivas, como picos, vales e interseções zero, nas ondas de entrada e saída é uma tarefa relativamente simples. Posteriormente, os intervalos entre os pontos correspondentes (designados como AA' e BB' na Figura 4-3) podem ser empregados para representar o tempo de viagem da onda de cisalhamento. Essa abordagem é viável quando as suposições de propagação de ondas planas e a inexistência de reflexões ou refrações são atendidas, conforme estabelecido por Chaney *et al.* (1998) e Viggiani *et al.* (1995). Porém, dado o amortecimento do material, atenuação e

conteúdo de frequência diferente dos sinais, os intervalos sucessivos AA' e BB' não são idênticos, com intervalos posteriores tendendo a ser maiores com o passar do tempo, de acordo com Suits *et al.* (2009). A Figura 4-3 apresenta um exemplo de análise pico a pico dos sinais obtidos nos ensaios mini *air hammer* (CAMELO, 2021).

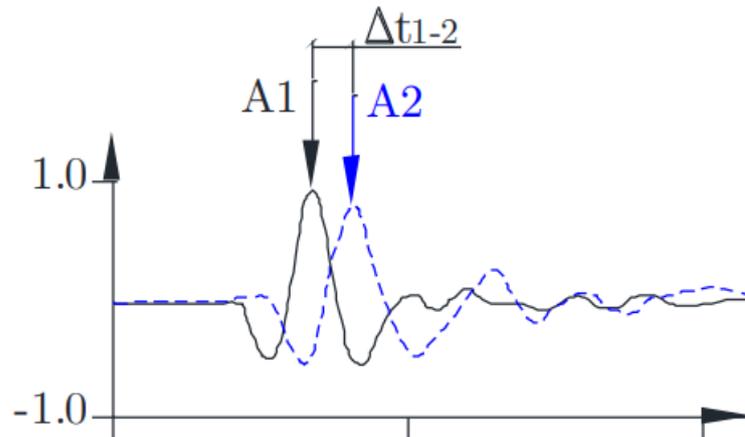


Figura 4-3 - Exemplo de sinal de output típico com os pontos em seta denotando as possíveis escolhas subjetivas para a chegada das ondas. Adaptado de Camelo (2021)

A realização da correlação cruzada entre um pulso de entrada de frequência única e sua resposta resulta em um pico em um deslocamento temporal que é considerado o tempo de viagem da onda entre os dois pontos, conforme descrito por Airey (2013). Essa abordagem é especificamente adequada para sinais de natureza semelhante, exigindo que as frequências de ambas as ondas sejam comparáveis em magnitude, como indicado por Viggiani (1995).

Em função das características dos sinais captados pelos acelerômetros, a análise pico a pico foi considerada a mais adequada. Sendo assim, foi utilizada na obtenção do tempo de propagação da onda cisalhante entre os acelerômetros (regiões I e S).

Os resultados obtidos nos ensaios com o mini *air hammer* seguem apresentados no Apêndice A. A Figura 4-4 apresenta o ensaio EA1_MB-51, um resultado típico dos sinais capturado pelos acelerômetros e registrados no software PicoScope 7, com processamento no software OriginPro, utilizando o filtro de transformada de Fourier para atingir o pico nítido máximo, utilizando a ferramenta “*peak analyzer*”. Os dados processados permitem a identificação dos primeiros picos nos sinais de cada um dos acelerômetros, permitindo obter o

tempo de viagem da onda de cisalhamento entre dois acelerômetros consecutivos. E conhecida a distância entre os acelerômetros obter a velocidade da onda cisalhante ($V_s = \Delta d / \Delta t$).

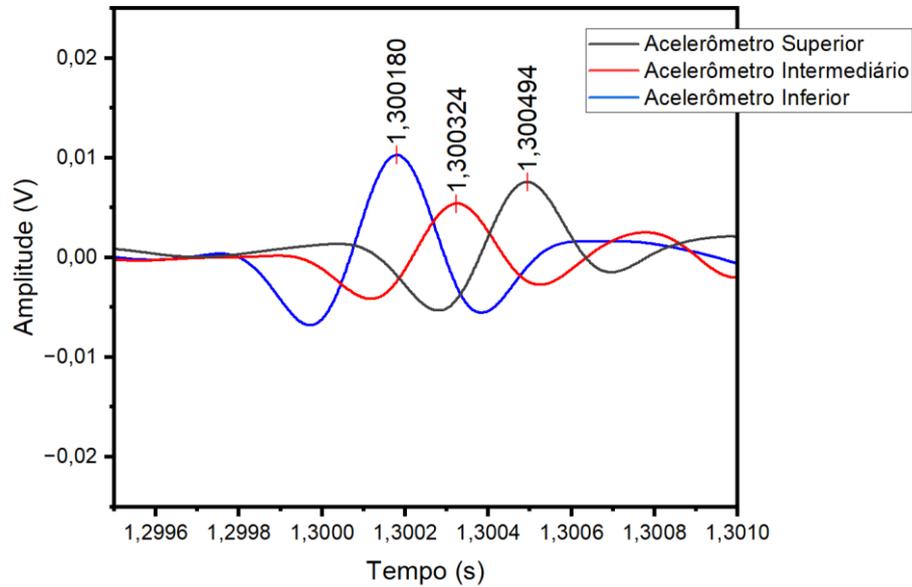


Figura 4-4 - Resultado típico dos ensaios mini *air hammer*

A Tabela 9 apresenta os resultados da velocidade da onda cisalhante obtidos nos ensaios com mini *air hammer* para os ensaios tipo MB e tipo MC.

Tabela 9 - Velocidades da onda cisalhante (m/s) obtidos dos ensaios mini *air hammer*

N	Região	EA1_MB	EA2_MB	EA3_MB	EA4_MB	EA5_MC	EA6_MC
26	V _s (I)	226	223	231	226	269	273
26	V _s (S)	192	194	206	197	180	180
51	V _s (I)	257	243	264	257	278	243
51	V _s (S)	206	219	265	208	219	216
77	V _s (I)	264	250	280	272	350	350
77	V _s (S)	240	227	240	233	206	230
110	V _s (I)	280	289	294	294	337	307

110	V_s (S)	227	222	236	236	243	211
-----	-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

A Figura 4-5 apresenta o gráfico da velocidade da onda cisalhante (V_s) em função da profundidade. Conforme mostrado abaixo, foi possível perceber a similaridade do comportamento de (V_s) em cada fator de escala. Além disso, é possível perceber que alguns valores do ensaio do tipo MC ficaram próximos aos valores obtidos nos ensaios do tipo MB, porém, na maior parte dos casos, seu módulo foi superior.

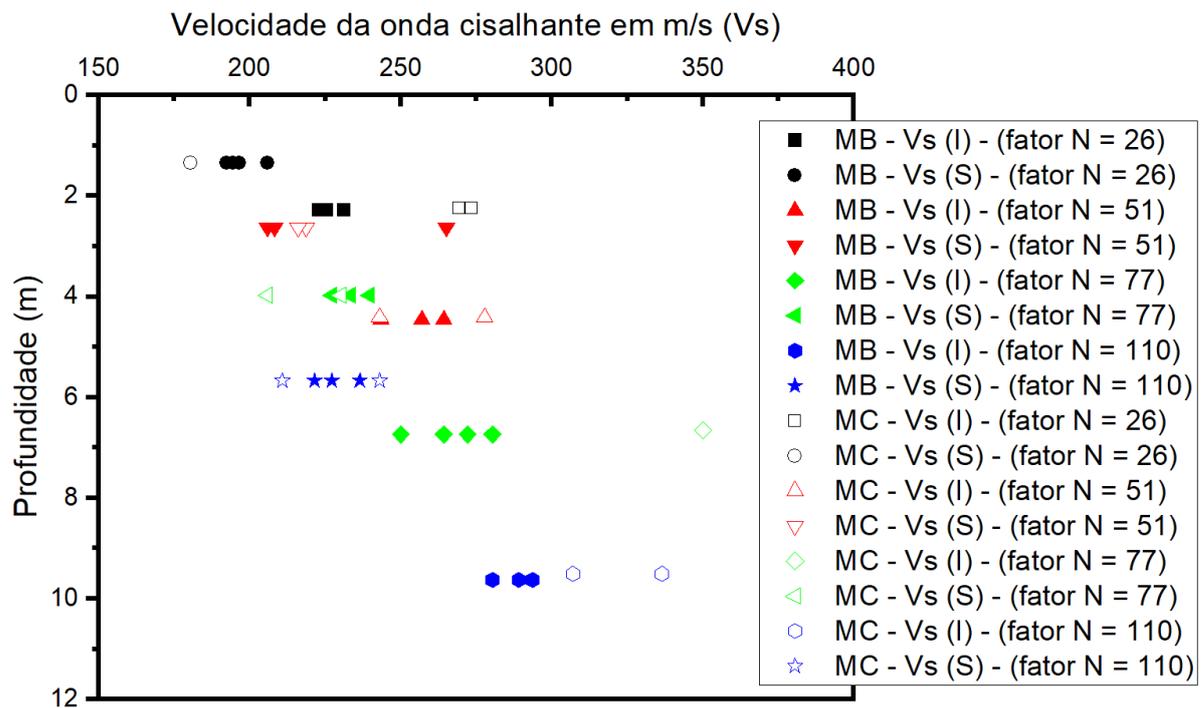


Figura 4-5 - Velocidade da onda cisalhante (V_s) x Profundidade

A Tabela 10 apresenta os resultados das velocidades da onda cisalhante, em m/s, analisados dos ensaios mini *air hammer* com a montagem tipo MB, com média, desvio padrão e coeficiente de variação. Foram desconsiderados os resultados do ensaios EA3_MB, devido à discrepância em seus valores. Com o fator de escala $N=26$, a diferença entre a velocidade na região I e S foi de 13,45%, já com o fator $N=51$, a diferença foi de 16,30%, para $N=77$, a diferença foi de 10,91% e para $N=100$, a diferença foi de 20,61%.

Tabela 10 - Resultados de V_s (m/s) dos ensaios mini air hammer tipo MB

N	Região	EA1_MB	EA2_MB	EA4_MB	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
26	Vs (I)	226	223	226	225	1,57	0,70%
26	Vs (S)	192	194	197	194	2,16	1,11%
51	Vs (I)	257	243	257	252	7,81	3,09%
51	Vs (S)	206	219	208	211	6,83	3,24%
77	Vs (I)	264	250	272	262	11,16	4,26%
77	Vs (S)	240	227	233	234	6,51	2,79%
110	Vs (I)	280	289	294	288	6,93	2,41%
110	Vs (S)	227	222	236	228	7,07	3,10%

A Tabela 11 apresenta os resultados das velocidades da onda cisalhante, em m/s, analisados dos ensaios mini *air hammer* com a montagem tipo MC, com média, desvio padrão e coeficiente de variação. Com o fator de escala $N=26$, a diferença entre a velocidade na região I e S foi de 33,50%, já com o fator $N=51$, a diferença foi de 16,12%, para $N=77$, a diferença foi de 37,67% e para $N=100$, a diferença foi de 29,56%.

Tabela 11 – Resultados de Vs (m/s) dos ensaios mini air hammer tipo MB

N	Região	EA5_MC	EA6_MC	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
26	Vs (I)	269	273	271	2,97	1,10%
26	Vs (S)	180	180	180	0,00	0,00%
51	Vs (I)	278	243	260	24,59	9,44%
51	Vs (S)	219	216	218	2,09	0,96%
77	Vs (I)	350	350	350	0,00	0,00%
77	Vs (S)	206	230	218	17,16	7,87%
110	Vs (I)	337	307	322	20,89	6,49%
110	Vs (S)	243	211	227	22,74	10,02%

4.3 PREVISÕES TEÓRICAS DE $G_{MÁX}$ VERSUS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 4-6 apresenta os valores de G_{max} experimentais (*air hammer*, coluna ressonante e *bender elements*) juntamente com as curvas obtidas através das formulações teóricas propostas na literatura técnica. Observa-se que os resultados experimentais ficaram bem alinhados em relação à formulação proposta por Seed e Idriss (1970), atingindo uma conclusão diferente daquela obtida por Futai (2018), cujos ensaios ficaram mais coerentes com os resultados obtidos por Oztoprak e Bolton (2013).

Os resultados apresentados através dos ensaios de colunas ressonantes e *bender elements* são para as tensões confinantes $\sigma_c = 50 \text{ kPa}$ e $\sigma_c = 100 \text{ kPa}$. Em relação aos ensaios realizados com a tensão confinante de 50 kPa, quando os resultados obtidos pelo ensaio mini *air hammer* foram comparados com os resultados obtidos por coluna ressonante, os resultados obtidos ficaram na ordem de 53,14% maior e quando comparados com *bender elements*, apenas 0,5% maior. Já para a tensão de 100 kPa, a diferença em relação aos ensaios de colunas ressonantes foi de aproximadamente 33,61% maior e em relação aos ensaios de *bender elements*, foi de 27,06% maior. Como esperado, os resultados obtidos ficaram mais similares

com aqueles obtidos pelos ensaios de *bender elements*, pois ambos se encontram no mesmo nível de deformações enquanto o ensaio de coluna ressonante é realizado em outro nível de deformações como demonstrado na Figura 2-1.

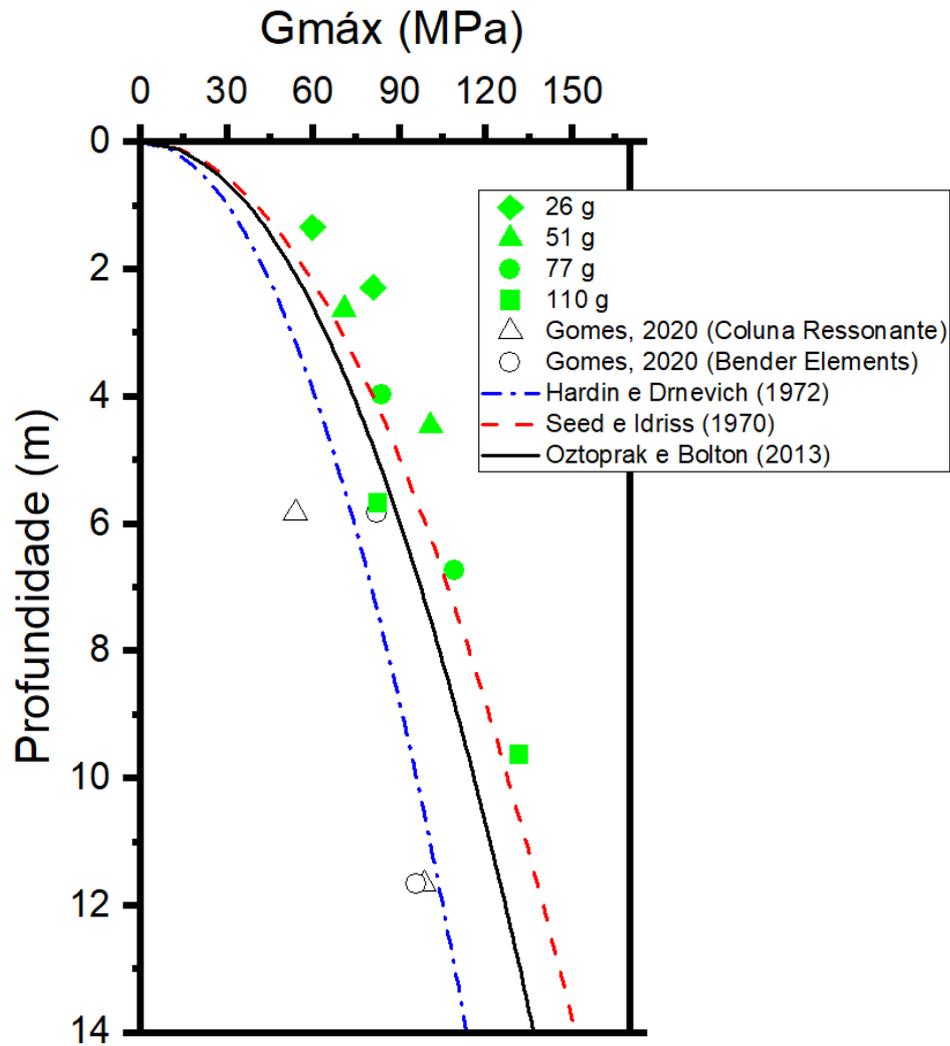


Figura 4-6 - Comparação entre os módulos cisalhantes máximos ($G_{máx}$)

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Mesmo com a inserção do *air hammer* e seus tubos, dos acelerômetros e seus cabos, no interior da amostra, foi possível obter a densidade relativa de 80% para a amostra de solo após a adaptação da altura inicial e dos deslocamentos vertical e horizontal do pluviador automático. Assim, foi comprovada a eficiência deste método desenvolvido por Ferreira (2021) na preparação das amostras.

O ensaio mini CPT realizado apresentou gráficos de resistência de ponta em função da profundidade cujo comportamento das amostras de solo foi muito semelhante entre eles. Desse modo, foi possível verificar a repetibilidade na preparação das amostras de solo. Além disso, o aumento linear da resistência de ponta ao longo da profundidade comprova a uniformidade das camadas pluviadas. O efeito duplo da borda foi de aproximadamente 13,66%, um pouco abaixo do esperado entre 16 a 30% mencionados no capítulo 2 deste trabalho.

5.2 ENSAIO MINI AIR HAMMER

O perfil de $G_{máx}$ com a profundidade foi determinado experimentalmente por meio da obtenção da velocidade da onda cisalhante (V_s) em ensaios centrífugos para diferentes valores da tensão confinante efetiva média imposta pela rotação da centrífuga. Para a realização desses ensaios, foram necessárias calibrações da célula de carga, o entendimento do funcionamento da centrífuga de braço, do osciloscópio e principalmente da análise dos dados captados pelos acelerômetros.

Os resultados experimentais obtidos nos ensaios mini *air hammer* foram comparados com as previsões teóricas, no qual o comportamento da amostra de solo foi semelhante à formulação proposta por Seed e Idriss (1970). Portanto, foi possível validar o dispositivo experimental e assim, comprovar o procedimento de ensaio mini *air hammer* desenvolvido para uso na centrífuga do Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (LM²C) da COPPE/UFRJ para obtenção do módulo cisalhante máximo ($G_{máx}$).

5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas futuras, consideramos o seguinte:

- Realizar ensaios *air hammer* com diferentes densidades relativas;
- Realizar ensaio *air hammer* com solos argilosos;
- Estudar as deformações causadas por diferentes pressões de impacto em diferentes solos para entender sua influência nos resultados;
- Realizar melhorias nas análises comparativas, utilizando trabalhos de diferentes autores e correlações empíricas com diferentes parâmetros.
- Realizar os ensaios *air hammer* com ele localizado na parte superior do solo da amostra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIREY, D.; MOHSIN, A. Evaluation of Shear Wave Velocity from Bender Elements Using Cross-correlation. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 36, n° 4, p.125, jul. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ20120125>.
- ALMEIDA, M.S.S., ALMEIDA, M.C.F., OLIVEIRA, J.R.M.S. Twenty years of Centrifuge Modeling at the Federal University of Rio de Janeiro. **3rd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics Eurofuge**, Nantes. 2016
- ALMEIDA, M.; ALMEIDA, M.; TREJO, P.; RAMMAH, K.; LUKIANTCHUKI, J.; GUIMARAES, M.; OLIVEIRA, J. R. The geotechnical beam centrifuge at COPPE centrifuge laboratory. 1. **Physical Modelling in Geotechnics - Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, ICPMG 2014**. vol. 1, p. 271–277, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1201/b16200-32>.
- ALMEIDA M.S.S. Migration of some pollutants through clayey and sandy soils: centrifuge modeling. **Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics**. La Braule, France, p.379-388, 2000.
- ALMEIDA, M.; BARRA, M.; GOMES, N.; GOMES, J.; ALMEIDA, M.; FUTAI, M. **Centrifuge modelling of monotonic and cyclic lateral responses of monopiles in quartz and carbonate sands**. 2023.
- ANDRUS, R.; STOKOE II, K. Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, vol. 126, n° 11, p. 1015–1025, nov. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:11\(1015\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015)).
- ARULNATHAN, R; BOULANGER, R.; KUTTER, B.; SLUIS, W. New Tool for Shear Wave Velocity Measurements in Model Tests. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 23, n° 4, dec. 2000, p. 444-453.
- BARRA, M. **Centrifuge modelling of monopile foundation for offshore wind turbines**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 123, 2020.

BARROS, J.; PINTO, C. **Módulo de cisalhamento dinâmico de solos tropicais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

BOLTON, M.; GUI, M. **The Study of Relative Density and Boundary Effects for Cone Penetration Tests in Centrifuge**. 1999.

BOLTON, M.; GUI, M.; GARNIER, J.; CORTE, J.; BAGGE, G.; LAUE, J.; RENZI, R. Centrifuge cone penetration tests in sand. **Géotechnique**, vol. 49, nº 4, p. 543–552, ago. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.4.543>.

BRIAUD, J. **Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

CAMELO, C. **Evaluation of the seismic response of gentle slopes in soft clay**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

CHANEY, R.; DEMARS, K.; ARULNATHAN, R.; BOULANGER, R.; RIEMER, M. Analysis of Bender Element Tests. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 21, nº 2, p. 120, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ10750J>.

DANZIGER, B.; VELLOSO, D. Correlations between the CPT and the SPT for some Brazilian soils. **Proceedings CPT**, v. 95, p. 155-160, 1995.

DAVE, T.; DASAKA, S. Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens. **Geomechanics and Engineering**, vol. 4, nº 2, p. 79–90, 25 jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2012.4.2.079>.

DRNEVICH, V.; WERDEN, S.; ASHLOCK, J.; HALL, J. Applications of the New Approach to Resonant Column Testing. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 38, nº 1, jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ20140222>.

FERREIRA, G. **Modelagem centrífuga do ensaio CPT em areias quartzosa e carbonatada**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) –

Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 102, 2021.

FILHO, W. **Considerações sobre ensaios triaxiais em areias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1987.

FUTAI, M.; DONG, J.; HAIGH, S.; MADABHUSHI, G. Dynamic response of monopiles in sand using centrifuge modelling. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, vol. 115, p. 90–103, 1 dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.007>.

GOMES, N. **Parâmetros geotécnicos estáticos e dinâmicos de areias quartzosa e carbonatadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 177, 2020.

GURUNG S.; ALMEIDA M.; BICALHO K. Migration of zinc through sedimentary soil models. **Proc. of the Int. Conf. Centrifuge**. Tokyo: 1998. p. 589–594.

HARDIN, B.; DRNEVICH, V. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, vol. 98, nº 7, p. 667–692, jul. 1972. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001760>

HARDIN, B.; RICHART, F. Elastic Wave Velocities in Granular Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, vol. 89, nº 1, p. 33–65, fev. 1963. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000493>.

KRAMER, S. **Geotechnical Earthquake Engineering**. New Jersey: Prentice Hall, 1996

KUERBIS, R. Nii-electronic library service sand sample preparation-the slurry deposition method. **Soil and Foundations**, vol 28, p. 107-118, dez. 1988. DOI: https://doi.org/10.3208/SANDF1972.28.4_107.

KUTTER, B.; MANZARI, M.; ZEGHAL, M. **Model Tests and Numerical Simulations of Liquefaction and Lateral Spreading**. Cham: Springer International Publishing, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22818-7>.

LEMOS, S. **Comportamento dinâmico de turbinas eólicas offshore sob carregamento lateral cíclico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2024.

LOPES, G.; SOUSA, J.R.; ALMEIDA, M.; ALMEIDA, M. A numerical methodology to predict the lateral load response of monopiles installed in sand considering soil stiffness degradation. **Ocean Engineering**, vol. 270, 15 fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113723>.

LUNNE, T.; POWELL, J.; ROBERTSON, P. **Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice**. Londres: CRC Press, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482295047>.

MADABHUSHI, G. **Centrifuge Modelling for Civil Engineers**. Londres: CRC Press, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315272863>.

MAPAS de projetos em licenciamento. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>. Acesso em: 09 jan. 2024.

MARSHALL, J.; WARRINGTON, R.; WATSON, W.; KIM, H. An introduction to immunology and immunopathology. **Allergy, Asthma & Clinical Immunology**, vol. 14, nº 2, p. 49, 12 set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13223-018-0278-1>.

MIURA, S.; TOKI, S.. A Sample Preparation Method and its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand. **Soils and Foundations**, vol. 22, nº 1, p. 61–77, mar. 1982. DOI: <https://doi.org/10.3208/sandf1972.22.61>.

OZTOPRAK, S.; BOLTON, M.. Stiffness of sands through a laboratory test database. **Géotechnique**, vol. 63, nº 1, p. 54–70, jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.078>.

PINCUS, H.; LO PRESTI, D.; BERARDI, R.; PEDRONI, S.; CRIPPA, V. A New Traveling Sand Pluviator to Reconstitute Specimens of Well-Graded Silty Sands. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 16, nº 1, p. 18, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ10263J>.

PINCUS, H.; FRETTI, C.; LO PRESTI, D.; PEDRONI, S. A Pluvial Deposition Method to Reconstitute Well-Graded Sand Specimens. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 18, nº 2, p. 292, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ10330J>.

SANTOS, P. **Caracterização da Rigidez Inicial de Areias Utilizando Bender Elements**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra. Lisboa, 2015

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2º ed. São Paulo: Oficina de Textos, vol. 1, 2012.

SCHOFIELD, C. **Homogenisation/blending Systems Design and Control for Minerals Processing: (with FORTRAN Programs)**. Pennsylvania State University: Trans Tech Publications, vol. 2, 1980.

SEED, H; IDRIS, I. **Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses**. 1970.

SUITS, L.; SHEAHAN, T.; FONSECA, A.; FERREIRA, C.; FAHEY, M. A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. **Geotechnical Testing Journal**, vol. 32, nº 2, p. 100974, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ100974>.

TARAZONA, S.; ALMEIDA, M.; ROMANEL, C. **Modelagem Centrífuga da Movimentação Lateral e Axial de Dutos em Leito Marinho Arenoso**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015

TAYLOR, R. **Geotechnical Centrifuge Technology**. Londres: CRC Press, p.296, nov 1994. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482269321>.

VIGGIANI, G.; ATKINSON, J. Interpretation of bender element tests. **Géotechnique**, vol. 45, nº 1, p. 149–154, mar. 1995. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1995.45.1.149>.

APÊNDICE A – ENSAIOS MINI AIR HAMMER

Fator de escala N = 110 (381 rpm)

A Tabela A-1 apresenta um resumo dos resultados obtidos através dos ensaios mini *air hammer* com fator de escala N = 100 (381 rpm) apresentados na Figura A-1. Conforme a programação de ensaio, a Figura A-1 (a), (b) e (c) apresenta os resultados dos ensaios com a montagem tipo MB e a Figura A-1 (d) e (e) apresenta os resultados com a montagem tipo MC.

Analisando os sinais captados nos ensaios a 110 g, observou-se que os resultados da velocidade da onda na região S ficaram coerentes com a preposição de Oztoprak e Bolton (2013) e a da região I ficou próxima à linha da preposição de Seed e Idriss (1970). Além disso, o resultado obtido na região I ficou muito próximo ao resultado do ensaio *bender elements*. Nos ensaios tipo MB, a diferença entre as velocidades de Vs (S) e Vs (I) foi de aproximadamente 20,61%. Já nos ensaios do tipo MC, essa diferença foi de 29,56%.

Tabela A-1 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios mini *air hammer*

Ensaio	Tempo (I) (s)	Tempo (S) (s)	Distância (I) (m)	Distância (S) (m)	Vs (I) (m/s)	Vs (S) (m/s)	G _{máx} (I) (m/s)	G _{máx} (S) (m/s)
EA1_MB_110	0,000132	0,000154	0,037	0,035	280	227	124,53	81,87
EA2_MB_110	0,000128	0,000158	0,037	0,035	289	222	132,44	77,78
EA3_MB_110	0,000126	0,000148	0,037	0,035	294	236	136,68	88,64
EA4_MB_110	0,000126	0,000148	0,037	0,035	294	236	136,68	88,64
EA5_MC_110	0,000104	0,000144	0,035	0,035	337	243	179,51	93,64
EA6_MC_110	0,000114	0,000166	0,035	0,035	307	211	149,40	70,46

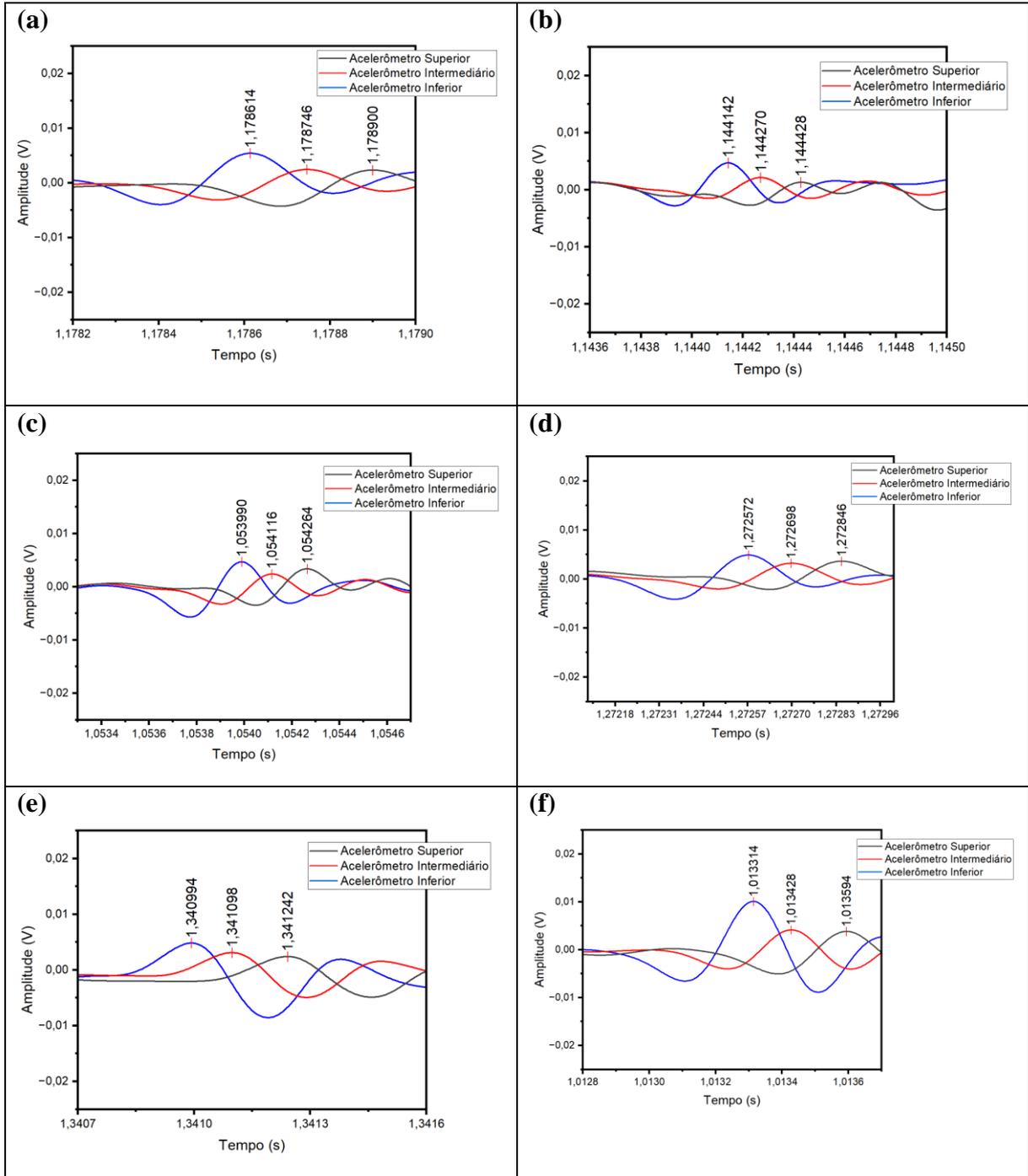


Figura A-1 - a) EA1_MB_110, b) EA2_MB_110, c) EA3_MB_110, d) EA4_MB_110, e) EA5_MC_110, g) EA6_MC_110

Fator de escala $N = 77$ (319 rpm)

A Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados obtidos através dos ensaios mini *air hammer* com fator de escala $N = 77$ (319 rpm) apresentados na Figura A-2. Conforme a programação de ensaio, a Figura A-2 (a), (b) e (c) apresenta os resultados dos ensaios com a montagem tipo MB e a Figura A-2 (d) e (e) apresenta os resultados com a montagem tipo MC.

Analisando os sinais captados nos ensaios a 77 g, observou-se que os sinais apresentam os picos nítidos. A pressão de 4,0 muito provavelmente foi ideal para essa aceleração, apresentando os melhores resultados em função da formulação proposta por Seed e Idriss (1970). Os resultados do ensaio EA3_MB_77 foram discrepantes em relação aos demais e por isso, estes sinais foram descartados para fins das análises e obtenção de Vs. Nos ensaios tipo MB, a diferença entre as velocidades de Vs (S) e Vs (I) foi de aproximadamente 10,91%. Já nos ensaios do tipo MC, essa diferença foi de 37,67%.

Tabela 12 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios mini *air hammer*

Ensaio	Tempo (I) (s)	Tempo (S) (s)	Distância (I) (m)	Distância (S) (m)	Vs (I) (m/s)	Vs (S) (m/s)	G _{máx} (I) (m/s)	G _{máx} (S) (m/s)
EA1_MB_77	0,00014	0,000146	0,037	0,035	264	240	110,71	91,09
EA2_MB_77	0,000148	0,000154	0,037	0,035	250	227	99,06	81,87
EA3_MB_77	0,000132	0,000146	0,037	0,035	280	240	124,53	91,09
EA4_MB_77	0,000136	0,00015	0,037	0,035	272	233	117,32	86,29
EA5_MC_77	1E-04	0,00017	0,035	0,035	350	206	194,16	67,18
EA6_MC_77	1E-04	0,000152	0,035	0,035	350	230	194,16	84,04

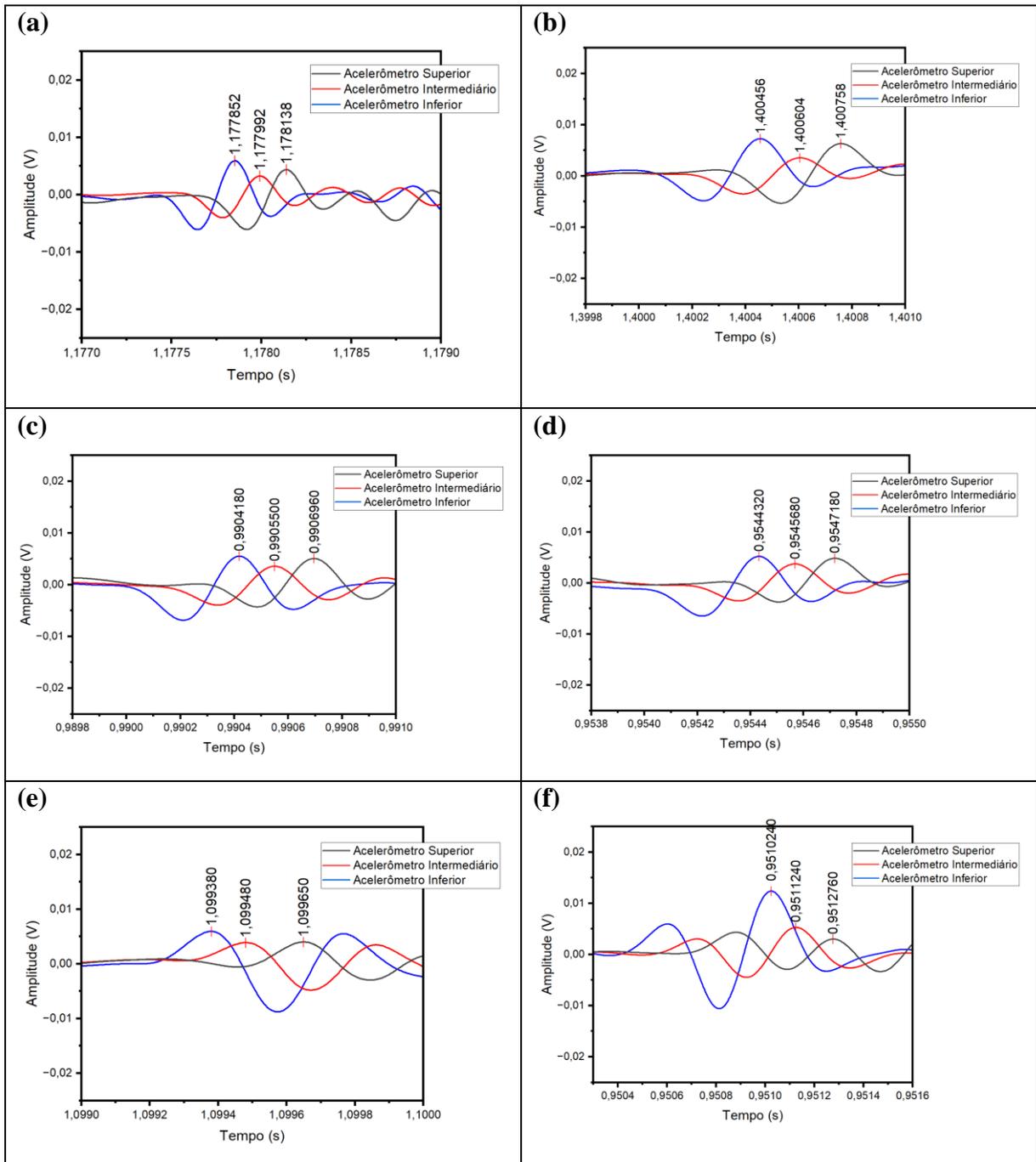


Figura A-2 - a) EA1_MB_77, b) EA2_MB_77, c) EA3_MB_77, d) EA4_MB_77, e) EA5_MC_77, g) EA6_MC_77

Fator de escala N = 51 (260 rpm)

A Tabela 13 apresenta um resumo dos resultados obtidos através dos ensaios mini *air hammer* com fator de escala N = 51 (260 rpm) apresentados na Figura A-3. Conforme a programação de ensaios, a Figura A-3 (a), (b) e (c) apresentam os resultados dos ensaios com

a montagem tipo MB e a Figura A-3 (d) e (e) apresentam os resultados dos ensaios com a montagem tipo MC.

Analisando os sinais captados nos ensaios a 51 g, observou-se que os sinais apresentam os picos nítidos. A pressão de 4,0 bar provavelmente foi ideal para essa aceleração, apresentando resultados coerentes em relação à formulação proposta por Seed e Idriss (1970). Os resultados do ensaio EA3_MB_51 foram discrepantes em relação aos demais e por isso, estes sinais foram descartados para fins das análises e obtenção de Vs. Além disso, o ensaio EA6_MC_51 apresentou um gráfico diferente dos demais, no qual o ápice do acelerômetro inferior ocorreu na primeira chegada de onda enquanto nos outros acelerômetros, esse pico aconteceu na segunda chegada de onda. Nos ensaios tipo MB, a diferença entre as velocidades de Vs (S) e Vs (I) foi de aproximadamente 16,30%. Já nos ensaios do tipo MC, essa diferença foi de 16,12%.

Tabela 13 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios mini *air hammer*

Ensaio	Tempo (I) (s)	Tempo (S) (s)	Distância (I) (m)	Distância (S) (m)	Vs (I) (m/s)	Vs (S) (m/s)	Gmáx (I) (m/s)	Gmáx (S) (m/s)
EA1_MB_51	0,000144	0,00017	0,037	0,035	257	206	104,64	67,18
EA2_MB_51	0,000152	0,00016	0,037	0,035	243	219	93,92	75,84
EA3_MB_51	0,00014	0,000132	0,037	0,035	264	265	110,71	111,43
EA4_MB_51	0,000144	0,000168	0,037	0,035	257	208	104,64	68,79
EA5_MC_51	0,000126	0,00016	0,035	0,035	278	219	122,30	75,84
EA6_MC_51	0,000144	0,000162	0,035	0,035	243	216	93,64	73,98

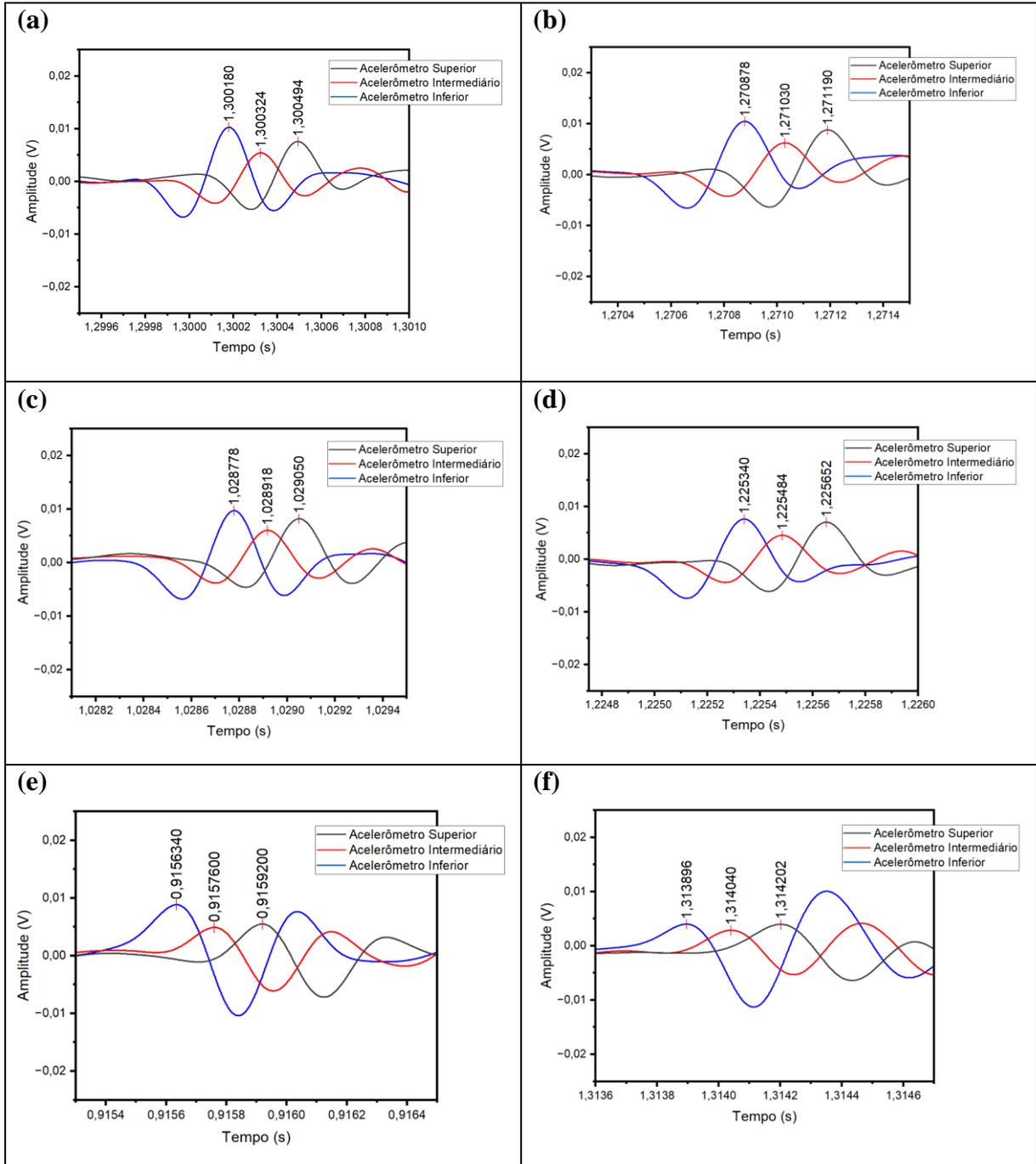


Figura A-3 - a) EA1_MB_51, b) EA2_MB_51, c) EA3_MB_51, d) EA4_MB_51, e) EA5_MC_51, g) EA6_MC_51

Fator de escala N = 26 (184 rpm)

A Tabela 14 apresenta um resumo dos resultados obtidos através dos ensaios mini *air hammer* com fator de escala N = 26 (184 rpm) apresentados na Figura A-4. Conforme a programação de ensaios, a Figura A-4 (a), (b) e (c) apresentam os resultados dos ensaios com

a montagem tipo MB e a Figura A-4 (d) e (e) apresentam os resultados dos ensaios com a montagem tipo MC.

Analisando os sinais captados nos ensaios a 26 g, observou-se que os sinais apresentam os picos nítidos. A pressão de 4,0 bar provavelmente foi acima do ideal para essa aceleração, apresentando resultados um pouco acima em relação à formulação proposta por Seed e Idriss (1970). Os resultados do ensaio EA3_MB_26 foram discrepantes em relação aos demais e por isso, estes sinais foram descartados para fins das análises e obtenção de Vs. Além disso, o ensaio EA5_MC_26 e EA6_MC_26 apresentaram gráficos diferentes dos demais, no qual o primeiro não apresentou pouca diferença de pico entre a primeira onda e a segunda e por outro lado, o ápice do acelerômetro inferior ocorreu na segunda chegada de onda enquanto nos outros acelerômetros, esse pico aconteceu na primeira chegada de onda. Nos ensaios tipo MB, a diferença entre as velocidades de Vs (S) e Vs (I) foi de aproximadamente 13,45%. Já nos ensaios do tipo MC, essa diferença foi de 33,50%.

Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios mini *air hammer*

Ensaio	Tempo (I) (s)	Tempo (S) (s)	Distância (I) (m)	Distância (S) (m)	Vs (I) (m/s)	Vs (S) (m/s)	Gmáx (I) (m/s)	Gmáx (S) (m/s)
EA1_MB_26	0,000164	0,000182	0,037	0,035	226	192	80,68	58,62
EA2_MB_26	0,000166	0,00018	0,037	0,035	223	194	78,74	59,93
EA3_MB_26	0,00016	0,00017	0,037	0,035	231	206	84,76	67,18
EA4_MB_26	0,000164	0,000178	0,037	0,035	226	197	80,68	61,28
EA5_MC_26	0,00013	0,000194	0,035	0,035	269	180	114,89	51,59
EA6_MC_26	0,000128	0,000194	0,035	0,035	273	180	118,51	51,59

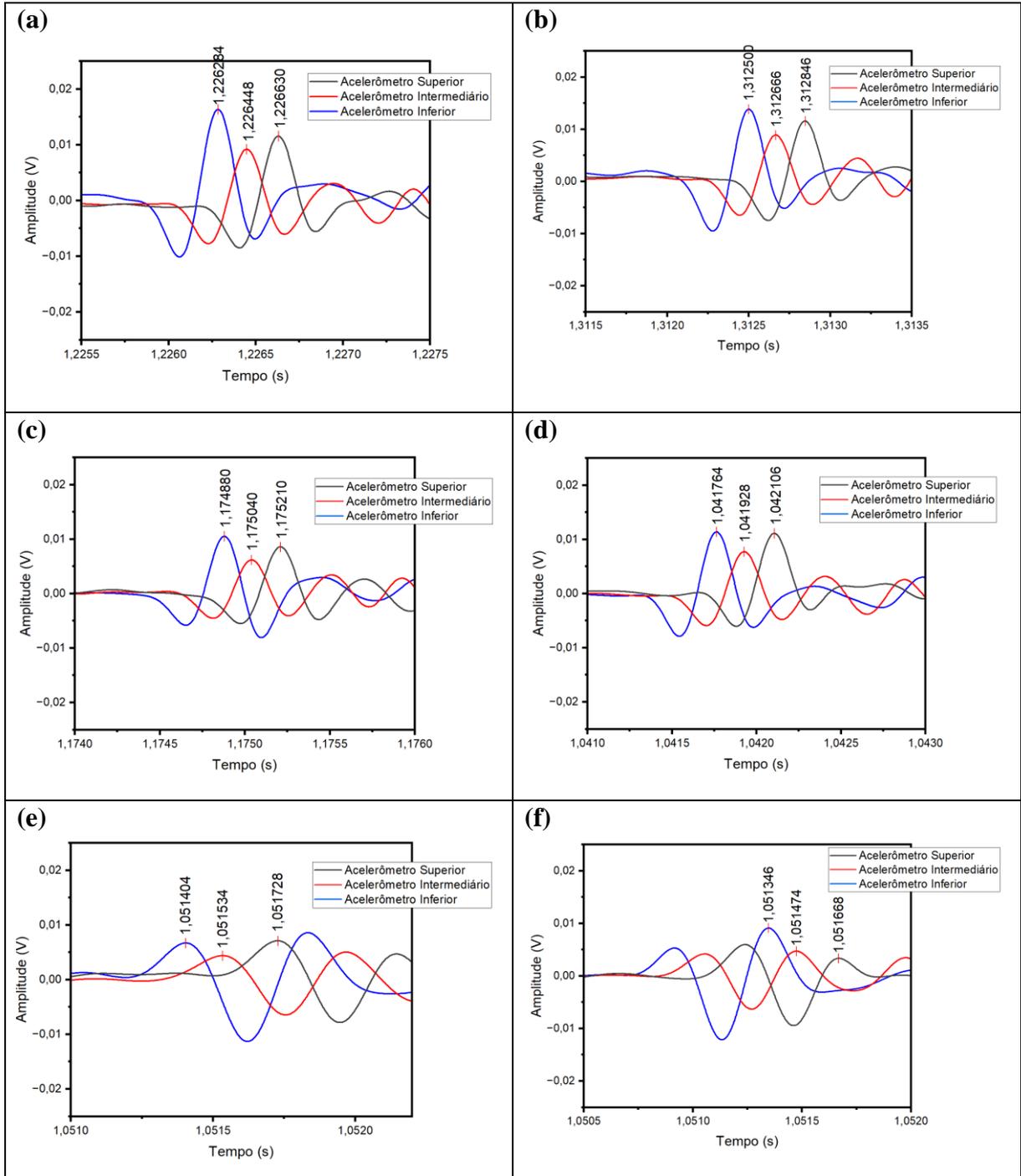


Figura A-4 - a) EA1_MB_26, b) EA2_MB_26, c) EA3_MB_26, d) EA4_MB_26, e) EA5_MC_26, g) EA6_MC_26